

**Untersuchungen zu den stofflichen Umsetzungen bei der  
aerob-thermophilen Belüftung und Einsatz des Verfahrens  
zur Nährstoffabtrennung aus Schweinegülle**

**Von der Gemeinsamen Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina  
zu Braunschweig  
zur Erlangung des Grades eines  
Doktors der Naturwissenschaften  
(Dr.rer.nat.)  
genehmigte  
Dissertation**

von Jochen Hahne  
aus Hannover

1. Referent:

Prof. Dr. K.-D. Vorlop

2. Referent:

Privatdozent Dr. H.-J. Jördening

eingereicht am: 06.09.2001

mündliche Prüfung (Disputation) am: 17.12.2001

2002

(Druckjahr)

## **Vorveröffentlichungen der Dissertation**

Teilergebnisse aus dieser Arbeit wurden mit Genehmigung der Gemeinsamen Naturwissenschaftlichen Fakultät, vertreten durch den Mentor, in folgenden Beiträgen vorab veröffentlicht.

## **Publikationen**

Schuchardt, F.; Hahne, J.; Janssen, J.; Sonnenberg, H.: Halbtechnische Untersuchungen zur Nährstoffabtrennung und –verwertung aus Flüssigmist durch aerob-thermophile Behandlung. Zwischenbericht 1 zum BMFT-Forschungsvorhaben 02-WA90/21. Institutsbericht M 176, Braunschweig (1991).

Schuchardt, F.; Hahne, J.; Janssen, J.; Sonnenberg, H.: Halbtechnische Untersuchungen zur Nährstoffabtrennung und –verwertung aus Flüssigmist durch aerob-thermophile Behandlung. Zwischenbericht 2 zum BMFT-Forschungsvorhaben 02-WA90/21. Institutsbericht M 180, Braunschweig (1992).

Hahne, J.; Janssen, J.; Schuchardt, F.; Sonnenberg, H.: Treatment of liquid manure with nutrient recovery. In: REUR Technical series 21: Biotechnologies for pollution control and energy: 226 – 244 (1992).

Schuchardt, F.; Hahne, J.; Janssen, J.; Sonnenberg, H.: Halbtechnische Untersuchungen zur Nährstoffabtrennung und –verwertung aus Flüssigmist durch aerob-thermophile Behandlung. Abschlussbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben 02-WA90/21. Institutsbericht M 188, Braunschweig (1993).

Schuchardt, F.; Hahne, J.; Sonnenberg, H.; Janssen, J.: Nährstoffabtrennung und –verwertung aus Flüssigmist durch aerob-thermophile Behandlung. In KTBL (Hrsg.): Umweltverträgliche Gülleaufbereitung: 66 – 75, Darmstadt (1994).

Hahne, J.; Schuchardt, F.: Güllebehandlung zur Nährstoffentlastung und Emissionsminderung. Landtechnik 49: 215 - 216 (1994).

Schuchardt, F.; Hahne, J.: Ein neues Verfahren zur Nährstoffentlastung von Gülle. Entsorgungspraxis 12: 54 – 59 (1994).

Hahne, J.; Schuchardt, F.: Güllebehandlungsanlage Cloppenburg-Stapelfeld. 1. Bericht zum wissenschaftlichen Begleitprogramm. Institutsbericht M 192, Braunschweig (1994).

Hahne, J.; Schuchardt, F.: Güllebehandlungsanlage Cloppenburg-Stapelfeld. 2. Bericht zum wissenschaftlichen Begleitprogramm. Institutsbericht M 193, Braunschweig (1995).

Schuchardt, F.; Hahne, J.; Sonnenberg, H.; Fink, A.: Verfahren zur Reduzierung von Nährstoffen in der Gülle. Korrespondenz Abwasser 42: 56 – 62 (1995).

Hahne, J.; Schuchardt, F.; Fink, A.: Aerob-thermophile Güllebehandlung zur N-Elimination und Entseuchung. Korrespondenz Abwasser 43: 1256 – 1263 (1996).

Hahne, J.: Stickstoffabtrennung aus Gülle. Entsorgungspraxis 14: 46 – 49 (1996).

Hahne, J.; Schuchardt, F.: Güllebehandlungsanlage Cloppenburg-Stapelfeld. 3. Bericht zum wissenschaftlichen Begleitprogramm. Institutsbericht M 194, Braunschweig (1996).

Hahne, J.; Beck, J.; Oechsner, H.: Management of livestock manure in Germany. Ingenieries, special issue: 11 – 22 (1996).

Schuchardt, F.; Hahne, J.: Aerobe Behandlung landwirtschaftlicher Reststoffe. In: Hösel, G.; Bilitewski, B.; Schenkel, W.; Schnurer, H. (Hrsg.): Müllhandbuch, Band 4, Kennziffer 5657: 1 – 33. Erich Schmidt Verlag, Berlin (1996).

Hahne, J.; Schuchardt, F.: Aerob-thermophile Güllebehandlung mit Stickstoffabtrennung. gwf Abwasser Spezial 138: 2 – 7 (1997).

Hahne, J.; Schuchardt, F.: Aerob-thermophile Nährstoffabtrennung aus Gülle. In: KTBL (Hrsg.): Umweltverträgliche Güllaufbereitung und –verwertung. KTBL-Arbeitspapier 242: 68 – 76 (1997).

Hahne, J.; Schuchardt, F.: Güllebehandlungsanlage Cloppenburg-Stapelfeld. 4. Bericht zum wissenschaftlichen Begleitprogramm. Institutsbericht M 196, Braunschweig (1997).

Hahne, J.; Schwarz, K.: Phosphatabtrennung und –rückgewinnung aus organisch hochbelasteter Gülle. Wasser Abwasser Praxis 6: 33 – 37 (1997).

Hahne, J.; Schuchardt, F.: FAL process for nutrient recovery from manure and disinfection. Proceedings of the 4<sup>th</sup> meeting of the EU Concerted action CT94 1897: 115 – 121, Rennes (1997).

Hahne, J.; Schuchardt, F.: New process for nutrient reduction from manure and disinfection. Dechema e.V. (Hrsg.): International meeting on chemical engineering, environmental protection and biotechnology, Abstracts of the lecture group „Environmental technology, sustainable development, water recovery and saving“, 2 Seiten,ACHEMA, Frankfurt/M. (1997).

Schuchardt, F.; Hahne, J.: Verwertung von Güllefeststoffen in einem Kompostwerk. Abfallwirtschaftsjournal 9: 28 – 31 (1997).

Hahne, J.; Schuchardt, F.: Abschlussbericht zum wissenschaftlichen Begleitprogramm zur Güllebehandlungsanlage Cloppenburg-Stapelfeld. Institutsbericht M 202, Braunschweig (1998).

Hahne, J.; Schuchardt, F.: Process of nutrient reduction and disinfection of manure. UTA International 7: 185 - 186 (1998).

Hahne, J.; Schuchardt, F.: Processo para desinfecção e redução de nutrientes nos efluentes de explorações pecuárias. *Tecnologias Do Ambiente* 7: 18 – 20 (1999).

## **Tagungsbeiträge**

Schuchardt, F.; Hahne, J.; Sonnenberg, H.; Janssen, J.: Nährstoffabtrennung und –verwertung aus Flüssigmist durch aerob-thermophile Behandlung. (Vortrag), 1. BMFT-Statusseminar, Surwold-Börgermoor (1993).

Hahne, J.; Schuchardt, F.: FAL process for nutrient recovery from manure and disinfection. (Vortrag), EU Concerted Action 1897, 4<sup>th</sup> meeting, Rennes (1996).

Schuchardt, F.; Hahne, J.: Emissionsminderung, Reststoffverwertung – Problematik und Minderungsansätze. (Poster), EuroTier Hannover (1996).

Schuchardt, F.; Hahne, J.: Nährstoffabtrennung und Entseuchung von Gülle. (Poster), EuroTier Hannover (1996).

Hahne, J.; Schuchardt, F.: Aerob-thermophile Nährstoffabtrennung aus Gülle. (Vortrag), KTBL- Fachgespräch „Umweltverträgliche Gülleaufbereitung und –verwertung, Braunschweig (1997).

Hahne, J.; Schuchardt, F.: Nährstoffabtrennung und Entseuchung von Gülle. (Poster),ACHEMA Frankfurt/M. (1997).

Hahne, J.; Schuchardt, F.: Neues Verfahren zur Nährstoffabtrennung und Entseuchung von Gülle. (Vortrag),ACHEMA Frankfurt/M. (1997).

Hahne, J.; Schuchardt, F.: Nährstoffabtrennung und Entseuchung von Gülle. (Poster),AGRITECHNICA Hannover (1997).

Hahne, J.; Schuchardt, F.: Process for nutrient reduction and disinfection of manure. In Voermans, A. M.; Monteny, G.(Editors): *Proceedings of the international Symposium „Ammonia and odour emissions from animal production facilities*. (Vortrag), Vinkeloord, Niederlande (1997).

Hahne, J.; Schuchardt, F.: Neues Verfahren zur Nährstoffabtrennung und Entseuchung von Gülle. (Poster), Dechema – Jahrestagung, Wiesbaden (1998).

Hahne, J.; Schuchardt, F.: Nutrient separation from liquid manure and disinfection. (Poster), EuroTier Hannover (1998).

Hahne, J.; Schuchardt, F.: Heißfermentation. (Poster), Biotechnologie-Forum, TU-Braunschweig (1999).

Hahne, J.; Schuchardt, F.: Nährstoffabtrennung und Entseuchung von Gülle. Möglichkeiten der Gülleaufbereitung und – verwertung. Fachtagung „Gülleverwertung – Neue Ansätze für die Landwirtschaft“. (Poster), Gülzow (1999).

Hahne, J.; Schuchardt, F.: Nährstoffabtrennung und Entseuchung von Gülle. (Poster), AGRITECHNICA Hannover (1999).

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung, Problemstellung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand des Wissens</b>	<b>4</b>
2.1	Seuchenhygienische Aspekte	4
2.1.1	Entseuchende Wirkung der Güllebelüftung	4
2.2	Geruchsminderung bei der Güllebelüftung	8
2.3	Kohlenstoffumsatz bei der Güllebelüftung	10
2.4	Stickstoffumsatz bei der Güllebelüftung	13
<b>3</b>	<b>Material und Methoden</b>	<b>19</b>
3.1	Substrate	19
3.2	Versuchsanlagen	21
3.2.1	Versuchsanlage für Versuche im batch- und halbtechnischen Maßstab	21
3.2.2	Demonstrationsanlage	24
3.3	Analyse-Verfahren	29
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>31</b>
4.1	batch-Versuche	31
4.1.1	pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit	31
4.1.2	Sauerstoff, Kohlendioxid und Redoxpotenzial	43
4.1.3	Selbsterhitzung	48
4.1.4	Trockenrückstand	53
4.1.5	CSB	57
4.1.6	BSB <sub>5</sub>	63
4.1.7	Flüchtige organische Säuren	67
4.1.8	Ammonium-Stickstoff	96
4.1.9	Gesamtstickstoff	103
4.1.10	Organischer Stickstoff	109
4.1.11	Entseuchung	115
4.2	Versuche im quasikontinuierlichen Betrieb	118
4.2.1	Allgemeiner Fermentationsablauf	118
4.2.2	Quasikontinuierliche Versuche mit einer Belüftungsrate von 10 m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·h)	122
4.2.3	Quasikontinuierliche Versuche mit einer Belüftungsrate von 15 m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·h)	132
4.2.4	Quasikontinuierliche Versuche mit einer Belüftungsrate von 20 m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·h)	134
4.3	Massenstrom-Bilanzen	147
4.3.1	CSB-Massenströme	147
4.3.2	BSB <sub>5</sub> -Massenströme	148
4.3.3	Essigsäure-Massenströme	150
4.3.4	Propionsäure-Massenströme	151
4.3.5	NH <sub>4</sub> N-Massenströme	152
4.3.6	Nges-Massenströme	155
4.3.7	Entseuchung	158
4.4	Demonstrationsanlage	163
4.4.1	Rohg�llezusammensetzung	163
4.4.2	Separation	163

4.4.3	Aerob-thermophile Belüftung	167
4.4.4	Abgaswäsche	172
4.4.5	Dekantierung	173
4.4.6	Feststoff-, Nährstoff- und Energiebilanz des Gesamtverfahrens	175
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>178</b>
5.1	Stickstoffumsatz	178
5.2	Kohlenstoffumsatz	183
5.3	Entseuchung	186
5.4	Gesamtverfahren	187
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>189</b>
<b>7</b>	<b>Literatur</b>	<b>191</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>196</b>
8.1	Verzeichnis der Abkürzungen	196
8.2	Analysenkurzbeschreibungen, Geräte und Chemikalien	199

## **Danksagung**



## 1. Einleitung, Problemstellung und Zielsetzung

Mit einem Produktionswert von fast 10 Mrd DM [1] und einem Tierbestand von über 25 Mio. Tieren, der von 226.500 Betrieben gehalten wurde [2], ist die Schweinehaltung in Deutschland ein wesentlicher Wirtschaftsfaktor. 1996 betrug der Inlandsverbrauch an Schweinefleisch 4,48 Mio t (Schlachtgewicht), was einem Pro-Kopf-Verbrauch von 54,7 kg entsprach [2]. Diese intensive Schweinehaltung ist in Deutschland – wie auch in den europäischen Nachbarstaaten - lokal und regional konzentriert. Allein im Bundesland Niedersachsen wurden 1997 von knapp 30.000 Haltern mehr als 7,12 Mio Tiere gehalten [3]. Mehr als 62,5 % dieses Bestandes (4,35 Mio Tiere) entfiel 1996 auf den Regierungsbezirk Weser-Ems. Mehr als 61 % davon (2,67 Mio Tiere) wurden allein in den Landkreisen Cloppenburg, Vechta und Emsland gezählt. Die Schweinebestände, aber auch die Bestände an Hühnern und Mastputen, haben in dieser Region in den letzten 25 Jahren deutlich zugenommen, wobei sich bislang kein Ende dieser Entwicklung abzeichnet.

Dieser hohe und nach wie vor wachsende Tierbestand in diesen Regionen führt zu einem erheblichen und lokal begrenzten Anfall von Wirtschaftsdüngern, dessen umweltverträgliche und pflanzenbedarfsgerechte Verwertung auf den zur Verfügung stehenden landwirtschaftlichen Nutzflächen nicht mehr gegeben ist. Während Geflügeltrockenkot aufgrund seiner Nährstoffgehalte transportwürdig ist und damit außerhalb der betroffenen Gebiete verwertet werden kann, trifft dies auf flüssige Wirtschaftsdünger nicht zu. Problemverschärfend wirken sich in diesem Zusammenhang Tierseuchenfälle aus, bei deren Eintreten ein Transportverbot von Wirtschaftsdüngern erfolgt.

Die Düngeverordnung [4] regelt die landwirtschaftliche Verwertung von Wirtschaftsdüngern. Auf der Grundlage dieser Verordnung dürfen auf Ackerland im Betriebsdurchschnitt maximal 170 kg N/(ha·a) und auf Grünland 210 kg/(ha·a) in Form von Wirtschaftsdüngern ausgebracht werden. Phosphor und Kalium dürfen nur in Mengen ausgebracht werden, die der Höhe des Phosphor - und Kaliumentzuges des Pflanzenbestandes entsprechen. Bedingt durch die hohen und nach wie vor wachsenden Tierbestände im Weser-Ems-Gebiet ist die Einhaltung der Düngeverordnung und damit eine umweltverträgliche und pflanzenbedarfsgerechte Verwertung von Wirtschaftsdüngern und anderen Reststoffen nicht mehr möglich. Allein im Landkreis Cloppenburg fallen N-Überschüsse von mehr als 1460 t/a und im Landkreis Vechta von 7240 t/a an [5]. Gasförmige Verluste bei Haltung, Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern wurden bei der Bilanzierung noch nicht mit berücksichtigt.

Eine nicht pflanzenbedarfsgerechte Ausbringung von Stickstoff im Rahmen der Wirtschaftsdüngeranwendung führt in vielfacher Hinsicht zu Umweltbelastungen der Kompartimente Luft, Boden und Wasser. Über den Luftpfad führt Ammoniak zu direkten Pflanzenschäden (Blattchlorosen) sowie zu erhöhter Trockenstressempfindlichkeit [6]. Natürliche Vegetation ist in diesem Zusammenhang empfindlicher als landwirtschaftliche Nutzpflanzen. Stickstoffarme Pflanzengesellschaften und Ökosysteme wie Hochmoore und Mager- sowie Trockenrasen werden bei erhöhten Ammoniakimmissionen verdrängt. Ammoniak wird von Nitrifikanten mikrobiell zu oxidierten Stickstoffverbindungen umgesetzt, wobei Säuren entstehen. Diese Versauerung führt zur Schädigung von Oberflächen-

gewässern (Artenverarmung durch pH-Wertabsenkung) und schwach gepufferten Böden (Rückgang der Makrofauna) sowie zur Zersetzung von Kalksteinbauten. Die Bodenversauerung führt ferner zur Freisetzung von Schwermetallen und zu Wurzelschäden. Neuartige Wäldschäden sind auch auf diese Umstände zurückzuführen. Hohe N-Immissionen verursachen ein verstärktes Pflanzenwachstum, wobei leicht Mangelerscheinungen an anderen Nährstoffen auftreten [7]. Das Schädigungsrisiko für Säureeinträge ist bei 90 % und für Stickstoff bei 99 % der Waldfläche Deutschlands überschritten [8]. Bedingt durch eine Stickstoffübersversorgung kommt es zu einer verstärkten Auswaschung von Nitraten in das Grundwasser, was zu einem stetigen Anstieg der Nitratkonzentrationen des Trinkwassers in Deutschland führt [9]. Ein erheblicher Anteil von Rohwasserbrunnen in Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen weist Nitratkonzentrationen von mehr als 50 mg/l auf [9]. Stickstoffeinträge in Oberflächengewässer führen zur Eutrophierung, verbunden mit einem verstärkten Algenwachstum. Diese „Wasserblüten“, die auch im Küstenbereich auftreten können, bedingen eine verstärkte Verschlammung der Gewässer und verursachen bei ihrer Zersetzung einen erhöhten Sauerstoffbedarf, der zum Absterben der Makrofauna führen kann.

Da die Tierhaltung Ammoniakemissionen von etwa 533.000 t/a und damit 82 % der nationalen Emissionen verursacht [10], müssen in diesem Bereich entsprechende Minderungsmaßnahmen ergriffen werden. Da die Gefahr von N-Verlusten in Gebieten mit hoher Tierbestandsdichte besonders hoch ist und im wesentlichen auf die Verwertung von Wirtschaftsdüngern zurückzuführen ist, bietet die Stickstoffabtrennung aus Gülle mit einer aerob-thermophilen Belüftung eine Option, diese negativen Umweltwirkungen zu verringern.

Die Schweinehaltung verursacht ferner vielfältige Geruchsbelastungen in der Umgebung von Stallanlagen (Haltung, Güllelagerung) sowie besonders bei der Ausbringung von Gülle. Der Umfang dieser Emissionen sowie ihre stofflichen Grundlagen sind Gegenstand vielfältiger Untersuchungen [11 - 14]. Die Geruchsemissionen haben eine sehr breite stoffliche Basis, wobei die einzelnen Stoffe vielfach nur in sehr geringen Konzentrationen nachzuweisen sind. Besonders geruchsrelevant sind daher Stoffe mit einer geringen Wahrnehmungsschwelle, wobei Mercaptane, Thioether, Thioketone, Nitrile, Amine, aber auch organische Säuren wie Butter- und Valeriansäure in ihrer hedonischen Wirkung als sehr unangenehm empfunden werden. Besonders gering ist die Wahrnehmungsschwelle für Indol (0,00015 mg/m<sup>3</sup>), Dimethylsulfid (0,006 mg/m<sup>3</sup>) und für Schwefelwasserstoff (0,025 mg/m<sup>3</sup>), während sie für Ammoniak mit 4 mg/m<sup>3</sup> vergleichsweise hoch ist [15]. Bei organischen Säuren liegen die Geruchsschwellenwerte zwischen 0,001 mg/m<sup>3</sup> (Buttersäure) und 2,7 mg/m<sup>3</sup> (Essigsäure) [16]. Die in vergleichsweise hohen Konzentrationen in der Gülle vorkommenden organischen Säuren werden bei der Belüftung durch die nativ in der Gülle enthaltenen Mikroorganismen oxidativ abgebaut, wobei als Reaktionsprodukte neben Biomasse und Abwärme geruchloses Kohlendioxid und Wasser gebildet werden. Schwefelverbindungen wie Schwefelwasserstoff und andere Sulfide werden zu Sulfaten oxidiert, die geruchlos sind. Die aerob-thermophile Belüftung bietet somit die Möglichkeit, Geruchsstoffe mikrobiell zu oxidieren und damit zu einer deutlichen Verringerung der Geruchsbelastung beizutragen.

Veredelungsbetriebe mit Nährstoffüberschüssen müssen zur Einhaltung der Düngeverordnung entweder Maßnahmen treffen, die den Nährstoffanfall im Betrieb verringern (optimierte Fütterung, Bestandsabstockung) oder die überschüssige Gülle aus

dem Betrieb ausschleusen und auf anderen landwirtschaftlichen Nutzflächen umweltverträglich verwerten. In diesem Zusammenhang fallen grundsätzlich Gülletransporte – im Oldenburger Münsterland auch über größere Entfernungen - an.

Gülletransporte und außerbetriebliche Gülleverwertung stellen grundsätzlich seuchenhygienische Risiken dar. Bei einer innerbetrieblichen Güllebehandlung ist die Weiterverbreitung von infektiösem Material eher unwahrscheinlich, während bei einer überbetrieblichen Behandlung eine Entseuchung von Gülle als Präventionsmaßnahme zur Verhinderung der Weiterverbreitung infektiöser Mikroorganismen nicht zuletzt wegen zahlreicher Tierseuchenfälle eine wachsende Bedeutung erlangt hat. Bei der Belüftung von Gülle treten infolge des dissimilatorischen Substratabbaus hohe Temperaturen auf, die je nach Güllezusammensetzung bis auf Werte von über 70 °C steigen können. Zur Inaktivierung pathogener Mikroorganismen ist die aerob-thermophile Belüftung somit prinzipiell geeignet.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es,

- die bei der aerob-thermophilen Belüftung auftretenden stofflichen Umsetzungen, insbesondere der geruchsrelevanten organischen Säuren, zu untersuchen,
- zu prüfen, ob und mit welchem Wirkungsgrad die aerob-thermophile Güllebelüftung zur Stickstoffabtrennung aus Schweinegülle und zur Entseuchung eingesetzt werden kann und welche Einflussgrößen dafür maßgeblich sind und
- ausgehend von den Ergebnissen der halbtechnischen Versuchsanlage ein Güllebehandlungsverfahren mit einer zusätzlichen Phosphorabtrennung zu realisieren.

## 2. Stand des Wissens

### 2.1 Seuchenhygienische Aspekte

Gülle kann eine Vielzahl von krankheitserregenden Mikroorganismen und Parasiten enthalten. Neben bakteriellen Erregern wie Salmonellen, *Escherichia coli*, Enterobakterien und Fäkalstreptococcen können auch verschiedene Viren (Herpes-Viren, Picorna-Viren) in Gülle nachgewiesen werden. Ferner muss auch mit dem Auftreten von Parasiten (Spulwürmer, Cryptosporidien) und deren Dauerformen gerechnet werden. Viele dieser Organismen stellen für die gehaltenen Tiere ein seuchenhygienisches Risiko dar und können in Einzelfällen auch dem Menschen gefährlich werden.

Salmonellen (Sal.) sind in Hinblick auf die Fleischhygiene relevant, weil sie beim Menschen vielfältige Krankheitssymptome (Nahrungsmittelvergiftung) hervorrufen. Bestimmte Arten wie *Sal. cholerae* suis und *Sal. typhi* suis führen zu akuten Allgemeinerkrankungen, Magen- und Darminfektionen bei Schweinen. Salmonellosen können auch bei anderen Haustieren auftreten. Die Salmonellose bei Rindern ist eine bedeutende und anzeigepflichtige Tierseuche, wobei 1988 459 und 1998 219 Fälle gemeldet wurden [1]. *Escherichia coli* verursacht akute Gesäugeentzündungen bei Sauen [17]. Streptococcen und Staphylococcen können chronische Gesäugeentzündungen hervorrufen, erstere verursachen ferner Blutvergiftungen, Gelenkentzündungen, Hirnhautentzündungen sowie Entzündungen der Herzklappen bei Schweinen [17]. Eine Infektion mit *Streptococcus suis* kann auch beim Menschen zu Hirnhautentzündungen führen.

Aujeszký-Viren verursachen die Aujeszkysche Krankheit, die insbesondere bei jungen Ferkeln mit einer hohen Sterblichkeitsrate verbunden ist. Die Krankheitssymptome sind sehr vielfältig und reichen von Benommenheit, Durchfall bis hin zur Lungenentzündung. Die Bedeutung dieser anzeigepflichtigen Tierseuche ist seit 1988 (1475 Fälle) rückläufig (1998, 15 Fälle) [1]. Picorna-Viren verursachen die eher harmlose Bläschenkrankheit, bestimmte Serotypen aber auch die hochansteckende Maul- und Klauenseuche. Die anzeigepflichtige Krankheit hat im Jahre 2001 zu massiven Tierschlachtungen und damit wirtschaftlichen Verlusten bei den Landwirten, besonders in England, Frankreich und den Niederlanden geführt.

Die Ansteckung mit Spulwürmern (*Ascaris suum*) führt bei Ferkeln zu schweren Krankheitssymptomen (Kurzatmigkeit, Husten, Fieber, Fressunlust) und zu wirtschaftlichen Verlusten. Ältere Tiere entwickeln eine körpereigene Immunität [17]. Cryptosporidien können bei immunsuppressiven Menschen zu Durchfallserkrankungen führen, aber auch bei Kälbern und Rindern Durchfallerkrankungen hervorrufen.

Dieser grobe Überblick verdeutlicht, dass im Sinne einer Prävention der Verbreitung von möglichen Tierseuchen und der Übertragung auf den Menschen eine möglichst weitgehende Hygienisierung bei der Güllebehandlung angestrebt werden sollte. Dies gilt insbesondere für Verfahren, die überbetrieblich eingesetzt werden sollen.

#### 2.1.1 Entseuchende Wirkung der Güllebelüftung

Erste Untersuchungen zum Einfluss der Belüftung auf die Überlebensfähigkeit pathogener Mikroorganismen wurden bereits 1970 begonnen. Wesentliche, auch sehr umfangreiche

Arbeiten zu diesem Thema sowie zur Inaktivierung von Parasiten wurden in den darauf folgenden Jahren u. a. von der Universität Hohenheim durchgeführt (Tab. 2.1).

Zu der Inaktivierung von **Salmonellen** bei der Belüftung von Schweinegülle liegen viele Ergebnisse vor. Während bei Temperaturen bis 33 °C keine schnelle Inaktivierung möglich war [25], wurden Salmonellen bei 39 °C und einem pH-Wert von 8 innerhalb von 34 h Belüftungszeit vollständig inaktiviert [32]. Höhere Temperaturen führten zu einem beschleunigten Absterben dieser Organismen. Bei pH-Werten von 8,5 und Temperaturen von 40 °C waren 10 h Belüftungszeit, bei Temperaturen von 45 °C nur noch 8 h zur vollständigen Inaktivierung von Salmonellen erforderlich [28]. Oberhalb von 53 °C wurden Salmonellen innerhalb von 60 min inaktiviert [34]. In Rindergülle, die vergleichsweise geringere Konzentrationen an Ammonium enthält, waren bei einem pH-Wert von 8,7 und 45 °C hierfür 48 h Belüftungszeit und bei einem pH-Wert von 9 und Temperaturen von 50 °C 2 h notwendig [23]. In gelagerter Gülle, die zuvor belüftet wurde, fand eine 90 % ige Reduktion innerhalb von einer Woche (bei 20 °C Lagertemperatur) statt, während bei 7 °C mehr als zwei Wochen benötigt wurden [30]. In unbelüfteter Gülle wurden vergleichbare Ergebnisse erst nach zwei (20 °C) bzw. mehr als sechs Wochen (7 °C) erreicht.

**Enterobakterien** wurden bei einem pH-Wert von 8,25 und einer Temperatur von 48,1 °C innerhalb von 48 h inaktiviert [32]. Vergleichbare Resultate wurden auch bei *E. coli* erzielt [34]. Bei der Lagerung zuvor belüfteter Gülle fand eine 90 % ige Reduktion in weniger als einer Woche statt (bei 20 °C). Bei einer Lagertemperatur von 7 °C waren hierfür 8,4 d erforderlich. Mehr als 10 d Lagerzeit waren zur Erzielung vergleichbarer Ergebnisse in unbelüfteter Gülle notwendig [30].

**Streptococcen** und **Fäkalstreptococcen** sind nach den Literaturangaben deutlich thermotoleranter. Zur Inaktivierung von Streptococcen waren in Schweinegülle Belüftungszeiten von 14 h bei 51,5 °C erforderlich [28]. *Streptococcus faecium* ließ sich erst nach 96 h bei Temperaturen über 68 °C und einem pH-Wert von 8,4 nicht mehr nachweisen [33]. Fäkalstreptococcen wurden innerhalb von 72 h bei 63,2 °C und einem pH-Wert von 8,3 nicht mehr reisoliert [33]. In gelagerter und zuvor belüfteter Gülle wurde eine 90 % ige Reduktion erst nach 47 d (20 °C) bzw. nach 134 d (7 °C) gemessen, bei der unbelüfteten Gülle dauerte es 49 bzw. 153 d [30].

Die Abtötung von **Aujeszky-Viren** in Schweinegülle gelang nach 50 h bei 40 °C [27], Viren der Maul- und Klauenseuche (Picorna-Viren) waren nach 48 h bei 50 °C nicht mehr nachweisbar [26]. Andere Autoren [24] fanden eine Inaktivierung von **Picorna-Viren** bei 48 °C nach 30 h (pH 6,6) bzw. 22 h bei 30 °C (pH 9,2).

**Parasiten** wie Schweinespulwürmer (**Ascaris suum**) und deren Dauerformen wurden in Schweinegülle bei 52 – 53 °C abgetötet [22]. Bei 35 – 40 °C wurden in Rindergülle entsprechende Dauerformen wie auch Eier von Peischenwürmern (**Trichuris suis**), Leberegel (Fasciola hepatica) sowie Eier von Coccidien (**Eimeria**) innerhalb von 14 d nicht abgetötet. Eier von Zwergfadenwürmern (**Strongyloides**) waren in Rindergülle bei 35 – 40 °C nach 4 d Belüftungszeit und Larven nach 10 d inaktiviert. Bei Temperaturen über 45 °C wurden die genannten Dauerstadien - abgesehen von den Eiern des Schweinespulwurms und des Schweinebandwurms (**Taenia**) – innerhalb von 3 d inaktiviert [20]. Untersuchungen von [19] ergaben, dass Eier und Zysten verschiedener Spul- und Lungenwürmer bei 55 °C

inaktiviert wurden. **Cryptosporidien-Oocysten** in Rindergülle lassen sich nach [33] bei 15 °C innerhalb von 2,6 bis 3,9 d, bei 30 °C innerhalb von 9,2 bis 11 h und bei 50 °C innerhalb von 13 – 15 min inaktivieren. Temperaturen von 35 – 45 °C führten bei Versuchen innerhalb von 24 h ebenfalls zu einer vollständigen Inaktivierung von Cryptosporidien [34].

Die vielfach nachgewiesene, entseuchende Wirkung der Güllebelüftung beruht auf mehreren Effekten. Die Einwirkung feuchter Hitze führt zur Koagulation der für den Stoffwechsel wichtigen Zellproteine. Die Inaktivierungsgeschwindigkeit steigt im Regelfall mit der Temperatur an. Vegetative Zellen von Bakterien und Pilzen werden bei Temperaturen von 60 °C innerhalb von 5 bis 10 min abgetötet, während für Sporen und andere Dauerformen höhere Temperaturen erforderlich sind [35]. Ammoniak, das bei der Belüftung von Gülle durch die Selbsterhitzung und durch die Strippung von Kohlendioxid (Anstieg des pH-Wertes) verstärkt gebildet wird, führt ebenfalls zur Denaturierung von Zellproteinen. Beide Effekte können eine kumulative Wirkung aufweisen. Das bestätigen beispielsweise Untersuchungen von Wassen [21, 23], der bei der Belüftung von Schweinegülle bei Temperaturen von 45 °C (pH 8,5) eine Inaktivierung von Salmonellen innerhalb von 8 h beobachtete, während bei Rindergülle unter vergleichbaren Bedingungen 48 h erforderlich waren. Rindergülle enthält im Regelfall geringere Konzentrationen an Ammonium und damit unter vergleichbaren Bedingungen auch geringere Ammoniakgehalte. Die Arbeiten von Munch et al. [30] zeigen ebenfalls, dass bei gleicher Lagertemperatur die Keimreduktion bei zuvor belüfteter Gülle schneller verläuft als in unbelüfteter. Dieser Effekt kann auch auf die Wirkung einer durch die Belüftung erhöhten Ammoniakkonzentration zurückgeführt werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die aerob-thermophile Belüftung von Schweinegülle bei Temperaturen über 50 °C, erhöhten pH-Werten und einer Mindestverweilzeit von 24 h zu einer weitreichenden Inaktivierung der bislang untersuchten und potenziell pathogenen Organismen führt.

Tab. 2.1: Übersicht zur Wirkung der Belüftung von Gülle auf die Reduktion von verschiedenen Bakterien, Viren und Parasiten

Autor	Jahr	Ergebnisse	Lit-Nr.
Strauch	1970	Inaktivierung von Salmonellen durch Umwälzbelüftung	18
Forstner	1974	Abtötung von Eiern und Zysten verschiedener Spul- und Lungenwurmart bei 55 °C	19
Enigk et al.	1975	Inaktivierung parasitärer Dauerformen bei 42 – 43 °C in 5 Tagen, bei 45 °C in 2 – 3 Tagen in Rindergülle	20
Wassen	1975	Abtötung von Salmonellen in Schweinegülle bei 40 °C nach 10 h, bei 45 °C nach 8 h, pH 8,5	21
Schaffert, Strauch	1976	Abtötung von Ascarideneiern bei 52 – 53 °C in Schweinegülle	22
Wassen	1976	Abtötung von Salmonellen in Rindergülle bei 45 °C und pH 8,7 nach 48 h, bei 50 °C und pH 9 nach 2 h	23
Nagel et al.	1976	Inaktivierung von Picorna-Viren bei 48 °C und pH 6,6 nach 30 h, bei 30 °C und pH 9,2 nach 22 h	24
Strauch, Fleischle	1979	Bei Temperaturen bis 33 °C sind Salmonellen auch nach 24 h im Oxidationsgraben noch nachweisbar	25
Böhm et al.	1980 (1)	Abtötung von Viren der Maul- und Klauenseuche nach 48 h bei 50 °C in Schweinegülle	26
Böhm et al.	1980 (2)	Abtötung von Aujeszky-Viren nach 50 h bei 40 °C in Schweinegülle	27
Kienlein	1980	Inaktivierung versch. Salmonellen in Schweinegülle nach 10 h bei pH 8,3 und Temperaturen von 48 – 50 °C, Abtötung von Streptococcen nach 14 h bei 51,5 °C	28
Albrecht, Strauch	1980	Abtötung von Picorna-, Reo- und Adenoviren bei 46 – 48 °C und pH 9	29
Munch et al.	1987	Temperatureinfluss (T= 7 und 20 °C) und Lagerzeit bis zu einer 90 % igen Abtötung von Testkeimen (Sal. typhimurium, Yersinia enterocolitica, Staphylococcus aureus, E. coli, Fäkalstreptococcen) in zuvor belüfteter und in unbelüfteter Gülle, Keimabtötung in zuvor belüfteter Gülle schneller, höhere Temperaturen erlauben kürzere Lagerzeiten, bei Fäkalstreptococcen in bel. Gülle 5,1-6,7 Wochen (20 °C), 19,2 Wochen (7 °C), in unbel. Gülle 5,5 – 7 bzw. 21,9 Wochen, bei Sal. typhimurium: 0,5-0,9 Wochen (bel., 20 °C), 1-2,2 Wochen (bel., 7 °C), 1,4-2 Wochen (unbel., 20 °C), 5,2-6,5 Wochen (unbel., 7 °C)	30
Oechsner	1991	Reduzierung von Enterobakterien nach 20 d (Schweinegülle) von $10^4$ auf $< 10^1$ KBE/ml, Reduzierung von Fäkalstreptococcen von $10^5$ auf $10^0$ KBE/ml nach 34 d (pH: 7,3 – 8,6)	31
Rückert	1991	Enterobakterien sind nach 48 h bei Temperaturen von 48,1 °C und einem pH von 8,25 in Schweinegülle inaktiviert, Salmonellen nach 34 h bei 39 °C und pH 8 (Sal. typhimurium) bzw. nach 48 h bei 48 °C und pH 8,2. Fäkalstreptococcen: Inaktivierung nach 72 h bei Temperaturen von 63,2 °C und pH 8,3, Streptococcus faecium: 96 h bei 68,1 °C und pH 8,4	32
Read, Svoboda	1995	Inaktivierung von Cryptosporidien-Oocysten bei 15 °C nach 2,6-3,9 d, bei 30 °C nach 9,2-11 h, bei 50 °C nach 13-15 min	33
Doll	1999	Inaktivierung von Enterobakterien und E. coli bei Temperaturen $> 45$ °C, Fäkalstreptococcen: innerhalb von 24 h bei Temperaturen zwischen 50 und 55 °C, Salmonellen innerhalb von 60 min bei Temperaturen $> 53$ °C, Abtötung von Cryptosporidien innerhalb von 24 h bei 35- 45 °C	34

## 2.2 Geruchsminderung bei der Güllebelüftung

Erste Untersuchungen zur Geruchsminderung bei der Belüftung von Schweinegülle wurden von Rüprich [36] bereits 1970 durchgeführt. Mit Hilfe von 20 Testpersonen wurden jeweils 12 belüftete und 12 unbelüftete Gülleproben jeweils 37 mal anhand einer vorgegebenen Bewertungsskala in Hinblick auf ihre Hedonik bemustert. Die Geruchsskala umfaßte 4 Stufen (Stufe 4: penetrant, nachhaltig stinkend, Stufe 3: typischer Schweinegeruch, abgeschwächt, Stufe 2: geringer Geruch nach Schwein, bei intensiven Aufrühren noch wahrnehmbar, Stufe 1: kein Schweinegeruch mehr feststellbar). Bei 35 oder 94,6 % der 37 Beprobungen unbelüfteter Gülle wurde ein penetranter Geruch wahrgenommen (Stufe 4). Demgegenüber wurde nach einer Güllebelüftung über 12 bis 15 d bei 28 oder 75,7 % der Bemusterungen kein Schweinegeruch mehr festgestellt (Stufe 1). Bei 7 oder 18,9 % der untersuchten Proben war ein leichter Geruch (Stufe 2) noch nachweisbar und lediglich bei 2 oder 5,4 % der Proben wurde noch ein abgeschwächter Schweinegeruch (Stufe 3) wahrgenommen. Auch in der Nähe der Belüftungsanlage traten keine nennenswerten Geruchsbelästigungen auf, was Rüprich auf die starke Schaumschicht zurückführte, die bei der Belüftung auftrat. Bei der Ausbringung belüfteter Gülle wurden nur geringe und kurzfristige Geruchsbelastungen beobachtet, deren hedonische Beurteilung als „humusartig“ beschrieben wurde.

Thaer et al. [37] beobachtete bei der Belüftung von Rindergülle mit Belüftungsraten von 5 bis 10  $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  starke und auch lang anhaltende Ammoniakgerüche, insbesondere ab Temperaturen über 40 °C. Bei einsetzender Nitrifikation bei geringeren Temperaturen trat kein Ammoniakgeruch mehr auf, vielmehr wurde dann ein erdiger, nicht mehr unangenehmer Geruch wahrgenommen. Der Rückgang der Ammoniakemissionen wurde mit absinkenden pH-Werten erklärt. Die Stabilität (Zeitraum bis zum Wiedereinsetzen von Gerüchen) der belüfteten Gülle wurde von Thaer mit maximal 6 Wochen angegeben. Bei feststoffarmen Güllen war die Stabilität besser als bei feststoffreichen.

Ginnivan [38] untersuchte die Geruchsminderung bei der Belüftung von Schweinegülle bei kontinuierlichem Betrieb mit hydraulischen Verweilzeiten von 12,5 d, wobei die Belüftungsraten zwischen 0,08 und 0,5  $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  variiert wurden. Die Gülletemperatur lag bei 20,5 °C. Im Vergleich zur unbelüfteten Probe wurde mit zunehmender Belüftungsrate eine Verbesserung des Geruchsminderungsgrades (gemessen mit der Verdünnungsmethode) erzielt. Bei Belüftungsraten von 0,08, 0,11 und 0,5  $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  ergaben sich Geruchsminderungsgrade von 77, 82 bzw. 97 %.

Sehr umfangreiche Arbeiten zur chemischen Grundlage des Geruchs, der Geruchsminderung bei der Belüftung von Gülle sowie der Lagerung belüfteter Gülle hat Williams [39] durchgeführt. Beprobte wurden sowohl batch-Versuche mit Belüftungszeiten von 4 bis 25 d als auch kontinuierliche Versuche mit hydraulischen Verweilzeiten von 5,1 – 8,4 d sowie die anschließend gelagerten Güllen. Die Belüftungsraten lagen bei maximal 2  $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ , vielfach auch unter 1  $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ , die Gülletemperaturen bei 15 °C. Bei der anschließenden Lagerung wurden Temperaturen von 10, 15 und 20 °C untersucht. Zur Beurteilung des Geruches verwendete Williams eine 6-stufige Skala (0= angenehm, 1= sehr schwach, 2= schwach, 3= deutlich unangenehm, 4= streng unangenehm, 5= extrem unangenehm). Für jede Bemusterung wurden 10 – 12 zufällig ausgewählte Probanden aus einem Team von insgesamt 34 Personen eingesetzt, die die zu bemusternden Proben entsprechend



einzuordnen hatten. Ziel der Untersuchungen war es, einen geeigneten und einfach zu bestimmenden Parameter für die Geruchsbelastung zu finden, wobei der BSB<sub>5</sub> der zentrifugierten Probe, organische Säuren, Indole und Phenole, Ammoniak und Schwefelwasserstoff diesbezüglich untersucht wurden. Während Ammoniak keine Aussagen über die Geruchsbelastung ermöglichte, organische Säuren, Indole und Phenole sowie Schwefelwasserstoff bei der Lagerung belüfteter Gülle als Indikator für den Geruch einsetzbar waren, ergab sich ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der BSB<sub>5</sub>-Konzentration der zentrifugierten Probe und der Geruchstoffbelastung. Dieser Zusammenhang gilt nach Williams sowohl bei der Belüftung als auch bei der Lagerung belüfteter Gülle. Williams fand bei seinen Untersuchungen die folgenden Zusammenhänge:

Geruchszahlenwert =  $0,411 \cdot \ln(\text{BSB}_5, \text{Überstand}) + 3,16$  (bei der Belüftung) und

Geruchszahlenwert =  $0,544 \cdot \ln(\text{BSB}_5, \text{Überstand}) + 2,96$  (bei der Lagerung der Gülle)

Der Korrelationskoeffizient dieser Funktionen lag bei 0,86. Sofern dieser Zusammenhang gültig ist, kann durch die Belüftung (Abbau des BSB<sub>5</sub>) zwar ein weitgehender, aber prinzipiell kein vollständiger Geruchstoffabbau erzielt werden. Selbst bei einem quantitativen BSB<sub>5</sub>-Abbau würde die belüftete Gülle noch einen (sehr) schwachen Geruch aufweisen.

Evans et al. [40] fanden einen Zusammenhang zwischen der Geruchsbelastung (Messung nach Methode von Williams [39]) und dem Redoxpotenzial. Mit sinkendem Redoxpotenzial stiegen die Geruchsbelastungen an. Nach Auffassung der Autoren muss für einen weitgehenden Geruchstoffabbau bei schwacher Belüftung (< 1% Sättigung) von einer Mindestbelüftungszeit von 7 d ausgegangen werden, wobei das Redoxpotenzial oberhalb von -200 mV gehalten werden sollte. Bei höheren Belüftungsraten (> 1% Sättigung) fanden die Autoren einen schnellen Geruchstoffabbau bei Temperaturen von 15 bis 50 °C.

Sneath et al. [41] untersuchten in einem Windtunnel Geruchsemissionen ausgebrachter Gülle, wobei unbehandelte Gülle mit einer über 4 Tage unter mesophilen Bedingungen belüfteten Gülle verglichen wurden. Obwohl die unbehandelte Gülle stark verdünnt war (TR= 10 g/kg), führte die Belüftung zu einer um 70 % geringeren Geruchsemission bei der Ausbringung.

In einen Übersichtsartikel über die Güllebelüftung führte Burton [42] eine Beurteilung der möglichen Geruchsminderung verschiedener Belüftungsverfahren bei verschiedenen Temperaturen durch. Demnach führen batch-Fermentationen sowohl im mesophilen wie auch im thermophilen Temperaturbereich zu einer deutlichen Geruchsminderung. Im kontinuierlichen Betrieb unterscheidet Burton Verfahren mit kurzer und langer hydraulischer Verweilzeit sowie verschiedenen Belüftungsintensitäten. Die höchste Geruchsminderung wird nach Burton bei höheren Belüftungsraten (> 1% Sättigung) und Verweilzeiten von mehr als 3 d erzielt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Güllebelüftung bei einer ausreichenden Sauerstoffversorgung und Belüftungszeiten von mindestens 3 d zu einer sehr deutlichen Geruchsminderung führt. Es können Geruchsminderungsgrade von 97 % erreicht werden. Als chemische Indikator für die Geruchsbelastung ist der BSB<sub>5</sub> in der zentrifugierten Probe sowohl zur Beurteilung der Geruchsminderung bei der Belüftung als auch bei der Lagerung belüfteter Gülle gut geeignet.

### 2.3. Kohlenstoffumsatz bei der Güllebelüftung

Erste Untersuchungen zur Belüftung von Schweinegülle wurden von Owens et al. 1973 durchgeführt [43]. In Hinblick auf den Kohlenstoffumsatz wurden Zusammenhänge zwischen der Schlammbelastung und den Parametern Abfiltrierbare Stoffe, pH-Wert, Gesamt-CSB und gelöster BSB<sub>5</sub> (BSB<sub>5s</sub>) festgestellt. Bei dem BSB<sub>5</sub>-Abbau wurden bei Temperaturen von 5, 10 und 15 °C keine Temperatureinflüsse beobachtet, während bei 25 °C eine Beschleunigung des Abbaus gefunden wurde.

Grundlegende Einflüsse der Temperatur auf physikalische, biologische und chemische Parameter wurden von Loll [44] aus der Literatur zusammengestellt und auch im Rahmen eigener Versuche untersucht. Viele dieser Aspekte tangieren den Kohlenstoffumsatz bei der Belüftung von Gülle. Die Sauerstoffsättigung in Wasser ist nach verschiedenen Autoren stark temperaturabhängig und sinkt von 14 mg/l (0 °C) auf etwa 4 mg/l (60 °C). Der Sauerstoffeintrag und der Stoffübergang, der vom Sauerstoffgefälle abhängig ist, wird somit bei steigenden Temperaturen negativ beeinflusst. Die Viskosität von Wasser (und damit auch von Gülle, die zu mehr als 90 % aus Wasser besteht), sinkt mit zunehmender Temperatur. Hierdurch ist bei gleichem Energieeinsatz bei höheren Temperaturen eine bessere Substratumwälzung möglich. Nach Loll wird bei steigender Temperatur eine höhere Diffusionsgeschwindigkeit von Sauerstoff in Wasser erzielt, die sich positiv auf den mikrobiellen Stoffumsatz auswirken kann. Die Abnahme der Oberflächenspannung bei steigenden Temperaturen führt nach Auffassung des Autors dazu, dass mit der gleichen Energie in der Flüssigkeit eine größere Oberfläche erzeugt werden kann. Dies führt zur Bildung kleinerer Luftblasen und damit zu einer besseren Sauerstoffausnutzung.

Eigene Untersuchungen zur Stabilisierung führte Loll durch, wobei er für Schweinegülle als technische Stabilisierungsgrenze ein BSB<sub>5</sub>/CSB-Verhältnis von etwa 0,1 ansetzte. Die Stabilisierungszeit ist sowohl substrat- als auch temperaturabhängig. Bei Temperaturen von 5 °C findet nach Einschätzung des Autors keine nennenswerte Stabilisierung statt, oberhalb von 5 °C sinkt die Stabilisierungszeit bis zu einer Temperatur von etwa 40 °C. Temperaturen über 40 °C führen nicht mehr zu einer weiteren Verkürzung der Stabilisierungszeit.

Umfangreiche Untersuchungen zum Kohlenstoffumsatz wurden von Evans et al. (1979) durchgeführt [45]. In kontinuierlich betriebenen Versuchsreaktoren mit Schlammrückführung bei mittleren Biomasse-Verweilzeiten von 0,5 bis 16 d untersuchten die Autoren den CSB-, BSB<sub>5</sub>- und den TR-Abbau sowie die Abnahme abfiltrierbarer Stoffe. Alle Versuche wurden bei einer Temperatur von 15 °C und einer Sauerstoffsättigung von 20 % durchgeführt. Die eingesetzte Schweinegülle wies eine TR-Konzentration von 29 g/l, eine CSB-Konzentration von 38,6 g/l und eine BSB<sub>5</sub>-Konzentration von 10,1 g/l auf. Die Versuche ergaben, dass der Abbau des Gesamt-CSB eine Funktion der Verweilzeit (R) war. Der maximal erreichte Abbaugrad lag bei 38 % (R= 7d) bzw. 43 % (R= 14d). Die weitere Erhöhung der Verweilzeit erbrachte kaum noch eine Steigerung des Wirkungsgrades. Für den Abbau des gesamten (CSB<sub>tot</sub>) und des gelösten CSB (CSB<sub>s</sub>) geben die Autoren folgende Funktionsanpassungen an:

$$\text{CSB}_{\text{tot, Ablauf}} [\text{g/l}] = [0,728/(1 + 0,14 R) + 0,504] \cdot \text{TR}_{\text{Zulauf}}$$

$$\text{CSB}_{\text{s, Ablauf}} [\text{g/l}] = 0,0303 \cdot \text{TR}_{\text{Zulauf}} + 0,915/R$$

Sie gelten für Biomasse-Verweilzeiten (R) von 0,5 bis 16 d und eine TR-Zulaufkonzentration von 29 g/l.

Weder der Gesamt-CSB noch der gelöste CSB sind damit vollständig abbaubar, auch nicht bei sehr langen Verweilzeiten. Beim Gesamt-BSB<sub>5</sub> fanden Evans et al. Abbaugrade von etwa 80 % bei Verweilzeiten von 8 d. Der größte Teil des BSB<sub>5</sub> war bereits nach 3 bis 4 d mineralisiert, danach verlief der Abbau sehr langsam. Noch schneller verlief der Abbau des gelösten BSB<sub>5</sub> (BSB<sub>5,s</sub>), der nach 2 Tagen bereits um mehr als 90 % abgenommen hatte und sich als Funktion der Verweilzeit ( $R = 0,5 - 16 \text{ d}$ ) beschreiben lässt. Für den Abbau des gelösten sowie des Gesamt-BSB<sub>5</sub> (BSB<sub>5,tot</sub>) geben Evans et al. bei einer TR-Zulaufkonzentration von 29 g/l folgende Funktionsanpassungen an:

$$\text{BSB}_{5s, \text{ Ablauf}} [\text{g/l}] = 0,113/R$$

$$\text{BSB}_{5\text{tot}, \text{ Ablauf}} [\text{g/l}] = 0,0704 \cdot \text{TR}_{\text{Zulauf}} + 2,694/R$$

Die Reduktion Abfiltrierbarer Stoffe (AFS) fiel bei den Versuchen mit etwa 20 – 30 % eher gering aus. Die Erhöhung der Verweilzeit über 8 – 10 d hinaus erbrachte kaum eine Verbesserung des Abbaus. Der Abbau des Trockenrückstandes (TR) lag zwischen 10 und 20 %. Für den Abbau der Abfiltrierbaren Stoffe sowie des TR geben Evans et al. bei einer TR-Zulaufkonzentration von 29 g/l folgende Funktionsanpassungen an:

$$\text{AFS}_{\text{Ablauf}} [\text{g/l}] = [0,466/(1 + 0,14 R) + 0,452] \cdot \text{TR}_{\text{Zulauf}}$$

$$\text{TR}_{\text{Ablauf}} [\text{g/l}] = [0,318/(1 + 0,14 R) + 0,706] \cdot \text{TR}_{\text{Zulauf}}$$

Vergleichende Untersuchungen zum Abbau von CSB und BSB<sub>5</sub> wurden von Evans et al. (1980) auch mit Hühner- und Rindergülle durchgeführt [46]. Bei Behandlungstemperaturen von 15 °C und einer Sauerstoffsättigung > 20 % wurden keine prinzipiellen Unterschiede beim CSB- und BSB<sub>5</sub>-Abbau in Schweine-, Rinder- und Hühnergülle gefunden. Allerdings war der Anteil des unter den genannten Bedingungen nicht abbaubaren CSB in Rindergülle deutlich höher als bei den anderen Güllen.

Ginnivan [47] et al. untersuchten den Kohlenstoffumsatz bei 55 °C in einer kontinuierlich arbeitenden Versuchsanlage mit Verweilzeiten von bis zu 10 d. Die Sauerstoffsättigung betrug 10 bis 30 %. Der Abbau des Trockenrückstandes lag bei allen Untersuchungen bei 2,5 g/(l·d). Bei Verweilzeiten von 10 d wurde ein Abbaugrad von maximal 56 % gemessen. Im Vergleich zu den Untersuchungen von Evans et al. [45] wurde durch die hohe Behandlungstemperatur ein wesentlich weitgehender TR-Abbau erzielt. Hinsichtlich des CSB-Abbaus wurden Abbaugrade von mehr als 50 % gemessen, allerdings nur bei langen Verweilzeiten von 10 d. Nach den Ergebnissen von Ginnivan wurden nahezu 90 % des abbaubaren CSB innerhalb von einer Verweilzeit von 3 d mineralisiert, danach verlief der Abbau deutlich langsamer. Bei seinen Untersuchungen betrug der BSB<sub>5</sub>-Abbau 4 – 5 g/(l·d), wobei bei Verweilzeiten von 10 d ein 90 % iger Abbau erreicht werden konnte. Etwa 75 % des BSB<sub>5</sub> waren jedoch bereits bei Verweilzeiten von weniger als 2 d abgebaut. Im Vergleich zu den Versuchsergebnissen von [45] stellt Ginnivan fest, dass der TR-, CSB- und BSB<sub>5</sub>-Abbau bei Temperaturen von 55 °C deutlich beschleunigt abläuft und auch höhere Abbaugrade erreicht werden. Der wesentlich schnellere Abbau des CSB bei kurzen Verweilzeiten spricht nach Ginnivan auch für chemische Oxidationsvorgänge.

Smith und Evans [48] untersuchten den Einfluss der Sauerstoffsättigung auf den CSB-Abbau bei einer kontinuierlich betriebenen Versuchsanlage bei Verweilzeiten von 4 bis 8 d.

Die Behandlungstemperatur lag bei 15 °C. Getestet wurden Sauerstoffsättigungen von < 1 bis 40 %. Ein Einfluss der Sauerstoffsättigung auf den erzielten Abbaugrad konnte bei den Versuchsbedingungen weder für den Gesamt-CSB noch für die gelöste Fraktion festgestellt werden. Aussagen über die Abbaugeschwindigkeit oder das Verhalten bei höheren Temperaturen wurden nicht gemacht.

Hissett et al. [49] untersuchten die Respirationsraten bei der Belüftung von Schweinegülle bei Temperaturen von 5 bis 50 °C. Die Ergebnisse zeigten einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Temperatur auf der einen und der maximalen Respirationsrate sowie der Zeitdauer bis zu ihrem Auftreten auf der anderen Seite. Mit steigender Temperatur wurden höhere Respirationsraten nach kürzerer Zeit gefunden. Dieser Zusammenhang gilt nach den Untersuchungen von Hissett zwischen 5 und 40 °C. Oberhalb dieser Temperaturen sank die maximale Respirationsrate wieder leicht ab und die Zeit bis zu ihrem Auftreten stieg geringfügig an. Die gemessenen, maximalen Respirationsraten, bezogen auf die Trockensubstanz (TS), lagen bei 16 (5 °C), 53 (10 °C), 120 (15 °C), 164 (20 °C), 247 (30 °C), 335 (40 °C) bzw. 286 mg O<sub>2</sub>/(g TS·d) bei 50 °C.

Umfassendere Untersuchungen zum Einfluss der Verweilzeit (0,18 – 8 d) und der Temperatur (25 – 50 °C) auf den Kohlenstoffumsatz wurden 1983 wiederum von Evans et al. [50] durchgeführt und mit früheren Ergebnissen verglichen [45]. Der CSB-Abbau zeigte bei Temperaturen zwischen 25 und 45 °C bei den getesteten Verweilzeiten keine auffälligen Unterschiede. Temperaturen von 50 °C ergaben jedoch eine Verbesserung des Abbaus und eine Steigerung des Abbaugrades, wie sie auch von Ginnivan [47] gefunden wurde. Bei sehr kurzen Verweilzeiten bis 0,5 d wurde bei Temperaturen bis 40 °C eine Beschleunigung des BSB<sub>5</sub>-Abbaus gemessen. Temperaturen von 45 und 50 °C zeigten eine geringfügige Verschlechterung des BSB<sub>5</sub>-Abbaus auf ein Niveau, wie es bei Temperaturen von 25 bis 35 °C gemessen wurde. Bei längeren Verweilzeiten wurden keine auffälligen Unterschiede mehr festgestellt. Die erreichten Abbaugrade lagen um 80 %. Der TR-Abbau zeigte bei Temperaturen von 25 bis 45 °C keine auffälligen Unterschiede, wobei ein Abbaugrad von 10 – 20 % bei Verweilzeiten von 8 d erreicht wurde. Bei 50 °C wurde jedoch eine deutliche Verbesserung des Abbaus und eine Steigerung des Abbaugrades auf mehr als 30 % nachgewiesen und damit die Ergebnisse von Ginnivan [47] bestätigt. Wie Evans et al. zeigen konnten, wurde der Abbau Abfiltrierbarer Stoffe in vergleichbarer Weise günstig beeinflusst.

Blouin et al. [51] stellten bei ihren batch-Versuchen fest, dass bei einer Inkubationstemperatur von 37 °C 80 % des zentrifugierten CSB in Schweinegülle innerhalb von 10 d abgebaut werden konnte. Eine Animpfung mit adaptierten Mikroorganismen aus belüfteten Proben oder aus Belebtschlamm erbrachte keine Beschleunigung des Abbaus. Lediglich die Animpfung bereits belüfteter Gülle mit einem Pilz (*Chaetomium cellulyticum*) führte nach 4 d Inkubationszeit nochmals zu einer Halbierung des CSB in der zentrifugierten Probe. Andere Animpfungen mit Kulturen aus Erdaufschwemmungen oder belasteten Flüssen führten kaum zu einer Verbesserung des Abbaugrades. Nach Auffassung der Autoren ist ein weitergehender Abbau prinzipiell möglich, aber aufgrund der schlechten Abbaubarkeit der enthaltenen Komponenten nur schwer erreichbar.

Sneath et al. [41] untersuchten u.a. den CSB- und den TR-Abbau bei einer Praxisanlage mit verschiedenen hydraulischen Verweilzeiten. Die Belüftung wurde so betrieben, dass ein

Redoxpotenzial von 100 – 200 mV aufrechterhalten wurde. Sie stellten einen durchschnittlichen CSB-Abbaugrad von 24 % (Verweilzeit= 1 d), 31 % (2 d) bzw. 33 % (4 d) fest. Hinsichtlich des TR-Abbaus wurden Abbaugrade von 12 % (1 d), 10 % (2 d) bzw. 15 % (4 d) ermittelt.

Über den Kohlenstoffumsatz bei der Belüftung von Schweinegülle liegen eine Reihe von Ergebnissen vor. Der CSB-Abbau ist bei kurzen Verweilzeiten bei ausreichender Sauerstoffversorgung von der Temperatur und der Abbaugrad von der Verweilzeit abhängig. Nur bei geringen Temperaturen von  $\leq 15\text{ °C}$  ist der CSB-Abbau auch bei sehr geringer Sauerstoffsättigung ( $\leq 1\text{ %}$ ) nicht sauerstofflimitiert. Der erreichbare Abbaugrad liegt bei etwa 35 – 45 % unter mesophilen Versuchsbedingungen, kann jedoch bei thermophilen Bedingungen und langen Verweilzeiten auf maximal 56 % gesteigert werden. Ein Anteil von mindestens 44 % des CSB in Schweinegülle ist demzufolge als schwer abbaubar einzustufen. Der Abbau des Rest-CSB nach einer Belüftung ist mit dem Einsatz bestimmter Pilze möglich.

Der TR-Abbau unterliegt vergleichbaren Gesetzmäßigkeiten. Mit steigender Temperatur wird ein schnellerer Abbau erreicht. Bei thermophilen Betriebsbedingungen sind Abbaugrade von mehr als 30 % erreichbar, während unter mesophilen Bedingungen auch bei langen Verweilzeiten der erzielbare Abbaugrad eher bei 10 – 20 % liegt [41].

Bei ausreichender Sauerstoffversorgung ist der BSB<sub>5</sub>-Abbau bei kurzen Verweilzeiten temperaturabhängig und steigt mit der Temperatur bis auf etwa 40 °C an. Bei Verweilzeiten von bis zu 8 d werden Abbaugrade von 80 – 90 % erzielt. Der verbleibende Rest-BSB<sub>5</sub> beruht auf der endogenen Atmung von Mikroorganismen und kann daher unter praktischen Bedingungen nicht eliminiert werden. Der überwiegende Anteil des abbaubaren BSB<sub>5</sub> (70 % und mehr) wird bereits bei Verweilzeiten von 1 bis 3 d oxidiert.

## **2.4 Stickstoffumsatz bei der Güllebelüftung**

Erste Hinweise zu verstärkten Ammoniakverlusten bei der Belüftung von Schweinegülle (TR= 7 %) gehen auf Traulsen [52] zurück. In einer 3-stufigen Belüftungsanlage mit einem Gesamtvolumen von 75 m<sup>3</sup> und einer hydraulischen Verweilzeit von 21 d fand Traulsen neben einer starken Selbsterhitzung (1. Behälter: 60 – 70 °C, 2. Behälter: 50 – 60 °C) auch einen starken Gesamt - Stickstoffverlust von 44 %. Den Stickstoffverlust führte er im wesentlichen auf Ammoniakabgasungen zurück, die oberhalb von 50 ° in starkem Umfang auftraten.

Jensen [53] stellte bei seinen Versuchen zur Langzeitbelüftung von Schweinegülle ebenfalls starke Ammoniakabgasungen fest und führte diese auf die Substrattemperatur und den pH-Wert zurück. Bei relativ stark schwankenden Belüftungsraten von bis zu 2 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup> · h) und einer Temperatur von 40 °C wurden für Ammoniak Emissionsmassenströme von bis zu 32 g/(m<sup>3</sup> Gülle·h) gemessen. Die stärksten Ammoniakemissionen traten nach 5 – 10 d Belüftungszeit auf.

Thaer et al. [37] beobachteten bei ihren Versuchen zur Belüftung von Rinderflüssigmist neben Ammoniakabgasungen (in den ersten Belüftungstagen) auch Nitrifikationsvorgänge (nach etwa 15 d). Die Nitrifikation blieb jedoch auf der Stufe des Nitrits stehen, was die Autoren auf eine Hemmung der Nitratbildner durch freies Ammoniak zurückführten. Ferner stellten die Autoren nach Zugabe frischen Rindermistes Denitrifikationsvorgänge fest. Die Denitrifikation kann auch während der Belüftung von Gülle mit hohen TR-Konzentrationen auftreten. Die Stickstoffverluste durch Ammoniakabgasung lagen bei 42 %, trat darüber hinaus noch eine Denitrifikation auf, betrugen sie 54 %.

Vergleichende Untersuchungen zum Stickstoffumsatz in Rinder- und Schweinegülle führte Grabbe [54] durch, bei denen auch der Einfluss der Nitrifikation untersucht wurde. In batch-Versuchen mit einer Belüftungsrate von  $1 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  bei Temperaturen von 20 – 28 °C stellte Grabbe bei Schweinegülle in den ersten 1 bis 2 d der Belüftung ein starkes mikrobielles Wachstum, verbunden mit einer  $\text{NH}_4$ -Assimilation sowie einer Temperaturerhöhung, fest. Mehr als 40 % des gelösten Stickstoffs wurden in dieser Zeit assimiliert. Danach verliefen Autolyse und Assimilation mit gleicher Geschwindigkeit, so dass bis zum 4. Tag die Ammonium-Stickstoffkonzentration konstant blieb. Ab dem 4. Tag trat eine starke Erhöhung der  $\text{NH}_4\text{N}$ -Konzentration auf, die Grabbe auf die einsetzende Autolyse zurückführte. In der Folgezeit traten starke Ammoniakverluste auf, die erst mit dem Einsetzen der Nitrifikation nach etwa 14 d stark abnahmen. Bei einem weiteren Versuch über 15 d, bei dem eine Nitrifikation beobachtet wurde, stellte Grabbe fest, dass bis zu 90 % des Ammonium-Stickstoffs durch Nitrifikationsvorgänge als Nitrit und Nitrat in der Gülle konserviert werden können. Bei Versuchen mit Rindergülle über 8 d wurden nur 48 % des Ammoniums als oxidiertem Stickstoff konserviert. Grabbe stellte bei seinen Versuchen keine Stickstoff-festlegung in hochmolekularen Fraktionen fest, vielmehr mündete der gesamte Stickstoffumsatz in einer Ammoniumbildung. Der Umfang der gasförmigen Ammoniak-verluste wurde maßgeblich durch die Nitrifikation beeinflusst. Die N-Verluste bewegten sich zwischen 10 und 52 %.

Owens et al. [43] stellten bei ihren kontinuierlichen Versuchen mit verschiedenen Schlammbelastungen (0,07 bis 0,32 g  $\text{BSB}_5/(\text{g TS} \cdot \text{d})$ ) fest, dass mit steigender Schlamm-belastung der pH-Wert im Ablauf von 5,2 auf 8,9 anstieg. Sie führten diese Beobachtungen auf die unterhalb bestimmter Schlammbelastungen auftretende Nitrifikation zurück. Während bei Temperaturen von 15 °C entsprechende Nitrifikationsvorgänge festgestellt wurden, war bei 5 °C keine Nitrifikation nachzuweisen. Ergänzende batch-Versuche bestätigten, dass die pH-Wertentwicklung bei der Belüftung von Schweinegülle bei längeren Belüftungszeiten maßgeblich durch die Nitrifikation bestimmt wurde.

Ginnivan et al. [47] konnten bei ihren kontinuierlichen Versuchen zur Belüftung von Schweinegülle mit hydraulischen Verweilzeiten von 1 bis 10 d zeigen, dass unter thermophilen Bedingungen (55 °C) keine Nitrifikation auftrat. Eine relativ starke Stickstoffassimilation wurde bei hydraulischen Verweilzeiten von 2 – 3 d anhand des Proteingehaltes gemessen, wobei die N-Konzentration bis zu 16 % des Trockensubstanz-gehaltes ausmachte. Längere Aufenthaltszeiten ergaben eine Abnahme des Proteingehaltes infolge von Autolysevorgängen.

Ghaly und Kok [55] untersuchten die Stickstoffumsetzungen bei der Belüftung von Schweinegülle im Oxidationsgraben. Die Verweilzeiten betrugen 6, 12, 18 und 24 h bei TR-Konzentrationen von 6, 4 und 3 %. Diese wurden durch Verdünnung einer konzentrierten Schweinegülle mit Wasser hergestellt. Während der Belüftung wurden Gelöstsauerstoff-Konzentrationen von 0,7 – 1,7 mg/l aufrechterhalten. Bei TR-Konzentrationen um 6 % wurde bei kurzen Verweilzeiten (6 h) 96 % des umgesetzten Ammoniums als Ammoniak gestrippt. Der gestrippte Anteil sank mit zunehmender Verweilzeit auf 62,3 % bei Verweilzeiten von 24 h. Die Assimilation von Ammonium stieg von 0 % (bei Verweilzeiten von 6 und 12 h) auf bis zu 32,2 % (bei Verweilzeiten von 24 h). Eine Nitrifikation wurde unter diesen Bedingungen nur in geringem Umfang nachgewiesen. Die Nitritstickstoff-Konzentrationen lagen bei 18 – 36 mg/l, die Nitratstickstoff-Konzentrationen bei 0 – 20 mg/l. Die erhöhten Nitritstickstoff-Konzentrationen wurden von den Autoren auf die Ammoniakhemmung der Nitrobacteriaceae zurückgeführt. Die Belüftung verdünnter Gülle mit einer TR-Konzentration von 3 % unter ansonsten konstanten Bedingungen erbrachte eine verringerte Ammoniakabgasung (von 70 % des umgesetzten Ammoniums auf 49 % sinkend) und eine verstärkte N-Assimilation (von 8,3 auf 41,8 % steigend). Der Umfang der Nitrifikation war nur leicht erhöht. Bei der Belüftung der am stärksten verdünnten Gülle (TR= 3 %) wurde insbesondere bei kurzen Verweilzeiten von 6 und 12 h eine deutlich geringere Ammoniakabgasung beobachtet. Sie betrug 9 bzw. 30,6 % des umgesetzten Ammoniums. Die N-Assimilation war unter diesen Bedingungen mit 69,8 bzw. 55,4 % vergleichsweise hoch. Längere Verweilzeiten erhöhten die Ammoniakabgasung auf über 53 % (bei 24 h Verweilzeit) und verringerten den Anteil der Assimilation (32,8 % bei einer Verweilzeit von 24 h). Der Umfang der Nitrifikation nahm tendenziell zu. 13 bis 21 % des umgesetzten Ammoniums mündeten in oxidiertem Stickstoff, wobei die Nitritstickstoff-Konzentrationen von 11 – 15 und Nitratstickstoff-Konzentrationen von 75 – 77 mg/l gemessen wurden. Die Autoren stellten zusammenfassend fest, dass eine relativ starke Stickstoffassimilation bei verdünnten Gällen oder kürzeren Verweilzeiten erzielt wurde. Der Umsatz von Ammonium erfolgte durch die Prozesse Assimilation, Nitrifikation und Verflüchtigung, wobei letzterer von wesentlicher Bedeutung war. Bei stark verdünnten Gällen war sowohl die Nitrifikation als auch die Assimilation im Vergleich zu den Verhältnissen bei konzentrierten Gällen leicht begünstigt.

Wedekind et al. [56] untersuchten ein mechanisch – biologisch arbeitendes Verfahren zur umweltverträglichen Behandlung großer, stark verdünnter Güllmengen. Bei mittleren Belüftungszeiten von 15 d, einer Schlammbelastung von 0,03 kg BSB<sub>5</sub>/(kg TS · d) sowie einer täglichen Durchflussmenge von 872 m<sup>3</sup> Gülle mit einer TR-Konzentration von 1,6 % wurde die Kjeldahl-N-Konzentration um 52 % reduziert. 68 % dieses Stickstoffs wurde nitrifiziert und stand somit zur Denitrifikation im vorgeschalteten Denitrifikationsbecken zur Verfügung. 32 % des Stickstoffs wurden bei der Belüftung entweder als Ammoniak gestrippt oder durch simultane Nitrifikation/Denitrifikation aus der Gülle eliminiert.

Evans et al. [57] führten kontinuierliche Versuche zum Stickstoffumsatz in Schweinegülle durch, wobei die Belüftungsraten und die hydraulischen Verweilzeiten variiert wurden. Die eingesetzte Gülle wies folgende Konzentrationen auf: TR: 29 g/kg, CSB: 38,6 g/kg, BSB<sub>5</sub>: 10,1 g/kg, NH<sub>4</sub>N: 0,93 g/kg, Nges: 1,9 g/kg. Bei einer Sauerstoffsättigung von mehr als 15 % und Verweilzeiten von weniger als 3 d wurden bei Temperaturen von 15 °C mehr als 40 % des Ammoniums als Ammoniak gestrippt. Bei längeren Verweilzeiten und Temperaturen bis maximal 40 °C wurde eine Nitrifikation beobachtet, die mit einem Abfall des pH-Wertes

einherging. Oberhalb von 45 °C trat keine Nitrifikation mehr auf. Der Umfang der Nitrifikation war von der Verweilzeit sowie von der Temperatur abhängig. Eine sehr weitgehende Nitrifikation beobachteten die Autoren bei Temperaturen von 25 – 35 °C und Verweilzeiten von mehr als 3 d. Demgegenüber führten Sauerstoffsättigungen von 1 – 15 % bei Versuchen mit einer Temperatur von 15 °C zu erheblichen Stickstoffverlusten in einer Größenordnung von 45 %, was die Autoren auf die unter diesen Bedingungen simultan ablaufenden Nitrifikations- und Denitrifikationsvorgänge zurückführten. Belüftungsversuche mit Sauerstoffsättigungen unter 1 % wurden ebenfalls untersucht. Bei hydraulischen Verweilzeiten von 2 und 7 d und einer Temperatur von 15 °C wurde weder eine N-Strippung noch eine Nitrifikation festgestellt. Höhere Temperaturen von 35 °C bei einer Verweilzeit von 2 d ergaben bei Überschreiten eines Redoxpotenzials von – 100 mV deutliche Stickstoffverluste in einer Größenordnung von 43 – 48 %. Unter diesen Bedingungen trat eine starke Ammonifikation auf. Bei einer hydraulischen Verweilzeit von 7 d und einer Temperatur von 50 °C lagen die N-Verluste mit 22 – 24 % bei Redoxpotenzialen von –50 bis 0 mV deutlich niedriger, aber auch in diesem Fall wurde eine starke Ammonifikation festgestellt. Zusammenfassend kamen Evans et al. zu dem Ergebnis, dass die Belüftungsrate (und damit die Gelöstsauerstoff-Konzentration) erheblichen Einfluss auf Art und Umfang des N-Umsatzes in der Gülle hat. Bei sehr schwacher Belüftung (Sättigung < 1 %) wurde Ammonium auch bei längeren Verweilzeiten weder nitrifiziert noch oxidiert. Höhere Belüftungsraten (Sättigung > 1 %) führten bei Verweilzeiten von bis zu 3 d zu starken Ammoniakabgasungen. Bei Verweilzeiten über 3 d kam es bei Sauerstoffsättigungen von 1 bis 15 % zu simultan ablaufenden Nitrifikations- und Denitrifikationsprozessen, so dass elementarer Stickstoff aus dem System ausgaste. Hohe Sauerstoffsättigungen ergaben eine weitgehende Nitrifikation, wobei der Stickstoff als Nitrat in der Gülle konserviert wurde.

Sneath et al. [41] führten in einer Pilotanlage Versuche zu Belüftung von Schweinegülle (TR: 13 – 20 g/l, CSB: 17 – 32 g/l, Nges: 1,5 – 2,3 g/l) durch. Die Belüftung erfolgte über einen Venturi-Belüfter, wobei das Redoxpotenzial zwischen 100 und 200 mV gehalten wurde. Die hydraulische Verweilzeit wurde zwischen 1 und 4 d variiert. Bei einer hydraulischen Verweilzeit von 1 d stellten die Autoren nur eine geringe Reduktion des Ammoniums (- 7%) fest, der assimilatorisch in organischem Stickstoff festgelegt wurde. Hydraulische Verweilzeiten von 2 d führten zu einer 39 %igen Reduktion von  $\text{NH}_4\text{N}$  und gleichzeitig zu einer 21 % igen Abnahme des Gesamtstickstoffs. Nitrit und Nitrat konnten im Ablauf nicht nachgewiesen werden. Die N- Verluste dürften bei dieser Verweilzeit im wesentlichen auf Ammoniakabgasungen zurückzuführen sein, zumal auch keine nennenswerte pH-Wertabsenkung beobachtet wurde. Verweilzeiten von 4 d ergaben mit 76 % eine signifikante Reduktion des  $\text{NH}_4\text{N}$ . Gleichzeitig wurden 56 % des Gesamtstickstoffs eliminiert und geringe Konzentrationen an Nitrit-N (0,31 g/l) und Nitrat-N (0,09 g/l) nachgewiesen. Darüber hinaus lag der pH-Wert im Ablauf mit 5,9 deutlich niedriger als bei hydraulischen Verweilzeiten von 2 d (7,0) und 4 d (7,4). Die Autoren bewerteten diese Ergebnisse als Hinweise für eine umfangreiche Nitrifikation. Allerdings wurden nur 49 % des eliminierten  $\text{NH}_4\text{N}$  als oxidiertem Stickstoff nachgewiesen, was die Autoren auf mögliche Mängel bei der Nitrit- und Nitratbestimmung zurückführten. Wahrscheinlich trat unter den beschriebenen Bedingungen eine simultane Denitrifikation auf, die für die Minderbefunde im wesentlichen verantwortlich waren.



Oechsner und Rüprich [58] untersuchten die aerob-thermophile Behandlung von Flüssigmist. Sie stellten eine starke Selbsterhitzung sowohl bei Rindergülle (58 °C) als auch bei Schweinegülle (68 °C) innerhalb von 5 d Belüftungszeit fest. Bei der Belüftung wurde eine deutliche TR-Reduktion von 13 % (Rindergülle) bzw. 37 % (Schweinegülle) gemessen. Die Stickstoffverluste in Form von Ammoniakausgasungen betrugen, bezogen auf den Gesamtstickstoffgehalt, 10 % (Rindergülle) bzw. 15 % (Schweinegülle).

Doll [34] führte verfahrenstechnische Untersuchungen an einer zweistufigen aerob-thermophil arbeitenden Anlage, in der Gülle aus einem Milchviehbetrieb behandelt wurde, durch. Zwei in Reihe geschaltete Reaktoren mit einem Nettovolumen von je 15 m<sup>3</sup> wurden mit je einem Tauch-Umwälzbelüfter belüftet. Die Belüftungsraten betrugen 0,4 – 0,5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup> · h). Die durchschnittliche Gesamt-Verweilzeit betrug 6 d. Die von Doll gemessenen Gesamt-Stickstoffverluste in Form von Ammoniakabgasungen waren mit 6,8 % sehr gering. Bei einem batch-Versuch lagen die N-Verluste nach 6 d bei 0,4 % und nach 27 d bei 7,4 %. Doll untersuchte ferner den zeitlichen Verlauf der Ammoniakausgasungen, wobei er feststellte, dass bis zum Erreichen einer Entseuchung (Zeitraum von 24 h, bei Temperaturen ≥ 50 °C) lediglich 0,5 – 1,1 % des Gesamtstickstoffs als Ammoniak emittiert wurden. Bei langanhaltender Belüftung bei Temperaturen über 50 °C stiegen die Emissionen an, lagen aber nach Autorenangaben generell unter 3 % des Gesamtstickstoffgehaltes.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Stickstoffumsatz bei der Belüftung von Gülle unter mesophilen Bedingungen intensiv untersucht wurde. Bei allen Untersuchungen stand die Vermeidung von Ammoniakemissionen bzw. die Konservierung des Stickstoffs in der Gülle im Vordergrund. Einzelne Untersuchungen zielten auf die Einbindung von Ammonium in die organische Masse ab, um diese als Futtermittel mit erhöhtem Proteingehalt nutzen zu können.

Geringe Belüftungsraten (Sauerstoffsättigung < 1 %) ergaben auch bei längeren Belüftungszeiten eine weitgehende Stickstoffkonservierung, wobei die Ammonifikation zur Erhöhung der NH<sub>4</sub>N-Konzentration in der Gülle führte. Mittlere Belüftungsraten (Sauerstoffsättigung 1 – 15 %) ergaben insbesondere bei Verweilzeiten von mehr als 3 d Stickstoffverluste, die im wesentlichen auf simultan ablaufende Nitrifikations- und Denitrifikationsprozesse zurückzuführen sind. Kürzere Verweilzeiten führten zu erheblichen Ammoniakemissionen. Hohe Belüftungsraten (Sauerstoffsättigung > 15 %) unter mesophilen Bedingungen ergaben eine weitgehende Nitrifikation des Ammoniums, insbesondere bei Verweilzeiten von mehr als 3 d, bei kürzeren Verweilzeiten traten hohe Ammoniakemissionen auf. Der Umfang der Nitrifikation sowie die Art der Reaktionsprodukte war in starkem Maße von den sich bei der Belüftung einstellenden pH-Werten abhängig. Bei schwach gepufferten, verdünnten Güllen oder hohen Nitrifikationsleistungen traten vermehrt niedrige pH-Werte (< 6) auf, die zwar Ammoniakemissionen unterbanden, aber auch zur Hemmung der Nitrifikation führten. Diese Hemmung beruht auf der Bildung salpetriger Säure, die für Nitrobacter- Arten in geringsten Konzentrationen von 0,006 mg/l [59], 0,02 mg/l [60], 0,22 mg/l [61] toxisch sind.

Andererseits werden Nitrobacter-Arten auch eher als Nitrosomonas-Arten durch Ammoniak gehemmt. Die Hemmgrenzen werden mit 10 mg/l [62], 30 – 50 mg/l [60] bzw. 50 mg/l [63] angegeben. Erhöhte Ammoniakkonzentrationen können bei der Belüftung von Gülle leicht auftreten. Dies liegt zum einen an den ohnehin hohen Ammoniumkonzentrationen in der

Gülle. Andererseits tritt bei einer stärkeren Belüftung durch die Strippung von Kohlendioxid eine pH-Wertanhebung auf. Eine weitere pH-Wertanhebung erfolgt über die Denitrifikation, die auch simultan ablaufen kann, so dass eine betriebsstabile Nitrifikation bei der Belüftung von Gülle insgesamt schwierig zu steuern ist.

Unter thermophilen Bedingungen ( $T > 45\text{ °C}$ ) treten im Regelfall keine Nitrifikationsvorgänge und damit auch keine Denitrifikationsprozesse (Mangel an oxidiertem Stickstoff) auf. Ammonium wird in Abhängigkeit der Belüftungsintensität und des pH-Wertes als Ammoniak gestrippt sowie bei kurzen hydraulischen Verweilzeiten auch assimilatorisch in Biomasse eingebaut. Längere Verweilzeiten bei erhöhten Temperaturen führen zu Autolyse-Vorgängen, die die Ammonium-Konzentration in der Gülle erhöhen. Über den Umfang der Ammoniakverluste liegen unterschiedliche Ergebnisse vor. Oechsner und Rüprich [58] gaben Werte von 10 % (Rindergülle) und 15 % (Schweinegülle), bezogen auf den Gesamtstickstoffgehalt, innerhalb von 5 d bei schwacher Belüftung an. Doll [34] beobachtete selbst bei Belüftungszeiten von 27 d nur Verluste von 7,4 % (Belüftungsrate:  $0,4 - 0,5\text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ). Evans et al. [57] fanden bei  $50\text{ °C}$  innerhalb von 7 d bei schwacher Belüftung (Redoxpotenzial:  $-50 - 0\text{ mV}$ ) Verluste von 22 – 24 %, bezogen auf den Gesamtstickstoffgehalt. Ginnivan et al. [47] beobachteten bei höheren Belüftungsraten (Sauerstoffsättigung: 20 – 30 %) deutlich höhere Stickstoffverluste. Sie bewegten sich zwischen 72 und 79 % (Verweilzeiten 2 – 4 d), bezogen auf den Ammoniumstickstoffgehalt der Rohgülle.

### 3. Material und Methoden

#### 3.1 Substrate

Für die Belüftungsversuche wurden mechanisch separierte Schweinegülle unterschiedlicher Zusammensetzung von verschiedenen Betrieben eingesetzt. Die Separierung mit einem handelsüblichen Pressschneckenseparator diente im wesentlichen der Verbesserung der Homogenität der Gülle sowie der Vermeidung möglicher Verstopfungen und Ablagerungen im Bioreaktor. Alle Gülle wurden sofort separiert und anschließend bis zu ihrem Einsatz in einem auf 7 °C temperierten Raum gelagert.

Die Zusammensetzung der Gülle für die batch-Versuche sowie für die quasikontinuierlichen Versuche sind in den Tab. 3.2 und 3.3 dokumentiert. Um repräsentative Ergebnisse hinsichtlich des Kohlenstoffumsatzes sowie der Stickstoffelimination bei der aerob-thermophilen Belüftung zu gewinnen, wurden unterschiedlich konzentrierte Gülle für die Versuche eingesetzt. Die Spannweite der einzelnen Parameter sowie wichtige Konzentrationsverhältnisse bestimmter Parameter sind in Tab. 3.1 zusammengefasst.

Tab. 3.1: Schwankungsbreite der Zusammensetzung separierter Schweinegülle sowie Konzentrationsverhältnisse wichtiger Parameter

Parameter	Einheit	Minimum	Maximum	Mittel	Probenzahl
pH-Wert	[ - ]	7,3	8,9	7,9	61
Trockenrückstand (TR)	[g/kg]	14,1	105,7	49,1	61
Org. Trockenrückstand (OTR)	[g/kg]	9,5	77,3	31,9	60
CSB	[g/kg]	17,6	116,5	66,5	60
BSB <sub>5</sub>	[g/kg]	8,5	48,6	22,7	53
Essigsäure (C2)	[g/kg]	0,70	11,80	5,07	52
Propionsäure (C3)	[g/kg]	0,39	4,35	2,27	52
Iso-Buttersäure (IC4)	[g/kg]	0,04	1,60	0,50	52
Buttersäure (C4)	[g/kg]	0	2,21	0,67	52
Iso-Valeriansäure (IC5)	[g/kg]	0	1,22	0,44	52
Valeriansäure (C5)	[g/kg]	0	0,22	0,08	52
NH <sub>4</sub> N	[g/kg]	1,86	7,74	5,16	61
N <sub>ges</sub>	[g/kg]	2,50	9,85	6,54	61
OTR/TR	[%]	52,2	73,4	64,8	60
O <sub>2</sub> -Bedarf: Org. Säuren/BSB <sub>5</sub>	[%]	18,8	83,2	52,9	44
O <sub>2</sub> -Bedarf: Org. Säuren/CSB	[%]	5,9	39,8	17,5	51
BSB <sub>5</sub> /CSB	[%]	20,7	67,1	34,6	52
NH <sub>4</sub> N/N <sub>ges</sub>	[%]	74,4	87,1	79,0	61
BSB <sub>5</sub> /NH <sub>4</sub> N	[%]	1,9	6,7	4,3	53

Die Zusammensetzung von Schweinegülle kann erheblichen Schwankungen unterliegen, die auf die Fütterung der Tiere, das Alter und die Temperatur der gelagerten Gülle sowie den Wassereintrag (Tränke, Fremdwasser) zurückgeführt werden können. Wichtig für die Zielsetzungen der Arbeit sind die teilweise hohen Konzentrationen an organischen Säuren, die eine niedrige Geruchsschwelle aufweisen sowie das BSB<sub>5</sub>/CSB-Verhältnis von durchschnittlich 0,35, dass die nur eingeschränkte Abbaubarkeit der Schweinegülle widerspiegelt. Dieses Verhältnis unterliegt ebenfalls großen Schwankungen, die im

wesentlichen auf Methanisierungsvorgängen anaerob gelagerter Gülle bei unterschiedlichen Temperaturen beruhen (Sommergülle/Wintergülle).

Tab. 3.2: Zusammensetzung der für die batch-Versuche eingesetzten, separierten Schweinegülle

V-Nr	pH [-]	TR [g/kg]	OTR [g/kg]	CSB [g/kg]	BSB <sub>5</sub> [g/kg]	C2 [g/kg]	C3 [g/kg]	IC4 [g/kg]	C4 [g/kg]	IC5 [g/kg]	C5 [g/kg]	NH <sub>4</sub> N [g/kg]	N <sub>ges</sub> [g/kg]
28	8,7	46,6	25,4	46,3	11,5	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	4,23	5,05
29	8,4	31,2	16,3	27,2	9,3	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	2,26	2,8
30	8	33,6	21,3	38,9	10,7	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	3,26	4,26
46	8	37,5	24	49,2	19,3	5,76	2,79	0,4	0,38	0,38	0,13	4,06	5,39
47	8,2	34,4	21,7	46,5	15,6	3,73	2,54	0,37	0,18	0,38	0,22	4,14	5,37
48	8,3	37,3	23,6	48,6	14,8	2,8	2,88	0,44	0,08	0,38	0,12	4,17	5,47
49	8,1	39,5	25,9	45,3	13,5	2,64	2,94	0,44	0,07	0,42	0,14	4,23	5,51
50	8,2	36,4	22,7	17,6	11,8	1,28	2,71	0,36	0	0,39	0,04	4,17	5,53
53	8,1	39,8	22,2	36,7	8,5	1,36	1,74	0,08	0	0,2	0	4,54	5,44
58	8,5	39,6	23,9	47,1	12,6	4,36	2,49	0,36	0,15	0,42	0,1	4,99	6,18
67	7,8	64,2	45	70,2	18,7	5,18	2,39	0,37	0,28	0,38	0,15	5,23	6,85
68	7,9	58,5	40,3	69,3	19,6	5,31	2,47	0,38	0,26	0,39	0,15	5,21	6,83
72	8	30,2	19,7	43,1	18,7	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	4,2	5,21
81	7,7	51,4	33,8	68,7	22,8	2,01	0,87	0,14	0,13	0,13	0,03	5,31	6,88
83	7,9	51,8	34	70,2	22,6	3,35	1,54	0,24	0,23	0,23	0,05	5,27	6,78
103	7,5	68,3	44	110,2	n.b.	5,44	1,42	0,36	0,98	0,49	0,07	7,14	9,02
104	7,6	72,4	47,5	116,5	n.b.	6,14	1,64	0,42	1,13	0,6	0,18	7,64	9,63
105	7,6	36,8	23,7	60,1	n.b.	2,79	0,74	0,19	0,51	0,25	0,03	3,91	5,05
106	7,7	17,9	11,4	31,8	n.b.	1,46	0,39	0,1	0,27	0,13	0,02	1,86	2,5
116	7,8	46,8	33	83,1	32,4	11,8	3,5	0,89	1,7	1,05	0,14	5,77	7,63
117	7,3	63,9	42,9	97,9	38,3	10,45	3,13	0,82	1,5	1,01	0,14	6,39	8,41
118	7,3	76,2	53,2	103,6	40,2	10,39	3,16	0,81	1,5	0,96	0,12	6,2	8,31
119	7,3	62,7	42	100	39,4	11,27	3,03	0,76	1,54	1,04	0,11	6,43	8,31
120	7,5	88,6	65	110,4	37,5	11,2	3,41	0,86	1,55	1,08	0,12	6,27	8,4
121	7,8	23,9	16,4	44,2	21,7	5,76	1,72	0,46	0,79	0,58	0,06	3,34	4,11
122	7,6	14,1	9,6	n.b.	12,7	3,43	0,97	0,27	0,43	0,05	0,03	2,14	2,61
123	7,6	33,1	22,2	56,3	21,7	5,72	1,76	0,44	0,78	0,61	0,06	3,88	4,73
124	7,6	105,7	77,3	104,9	43,3	10,9	3,46	0,87	1,42	1,13	0,11	6,49	8,38
125	7,5	69,9	49	103,8	39,9	9,47	3,24	0,86	1,44	0,18	0,11	6,44	8,18
126	7,5	14,6	9,5	21,4	10,4	2,67	0,94	0,28	0,39	0,07	0	2,08	2,75
127	7,9	63,1	40,9	91,8	33,9	7,47	3,25	0,95	1,46	0,21	0,1	7,16	9,15
128	7,9	61,5	39,3	88,1	37,8	7,61	3,39	1	1,53	0,22	0,1	7,22	9,1
129	7,9	65,2	42,9	87,2	39,2	8,03	4,35	1,6	2,14	0,65	0,13	7,26	9,32
130	8	63,9	41,3	92,1	48,6	6,03	3,61	1,42	1,74	0,64	0,12	7,3	9,31
132	7,8	49,3	32,2	78,2	28,4	4,48	2,35	0,74	0,96	0,19	0,02	6,15	7,62
133	7,7	47,5	30,1	74,5	36,1	4,95	2,47	0,69	0,96	0,15	0,04	6,21	7,56
134	8	49,7	31,2	75,8	30	4,7	2,46	0,72	0,86	0,27	0,01	6,4	7,87
145	8,2	29,8	19,3	47,8	19,8	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	4,67	5,57
149	8	46,5	31,2	66,3	20,1	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	5,31	6,33
151	7,7	38,2	24,5	54,8	21	0,7	2,93	0,72	0,07	0,49	0	5,15	5,99
152	8	77,4	56	82,2	18,6	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	5,16	6,4

V-Nr: Versuchs-Nummer, n.b.: nicht bestimmt, C2: Essigsäure, C3: Propionsäure, IC4: Iso-Buttersäure, C4: Buttersäure, IC5: Iso-Valeriansäure, C5: Valeriansäure

Etwa 53 % des BSB<sub>5</sub> bzw. 18 % des CSB werden von organischen Säuren verursacht. Im Durchschnitt liegen 56 % der organischen Säuren als Essigsäure, 25,1 % als Propionsäure, 5,6 % als Iso-Buttersäure, 7,4 % als Buttersäure, 4,9 % als Iso-Valeriansäure und 0,9 % als Valeriansäure vor. Der Stickstoff liegt in Schweinegülle mit einem Anteil von 79 % überwiegend als Ammonium vor. Lediglich 21 % des Stickstoffs sind organisch gebunden. Nitrit und Nitrat sind in Schweinegülle im Regelfall nicht nachzuweisen, so dass der Gesamtstickstoff als Summe aus Ammoniumstickstoff und organischem Stickstoff aufzufassen ist.

Tab. 3.3: Zusammensetzung der für die quasikontinuierlichen Versuche eingesetzten, separierten Schweinegülle

V-Nr	pH [-]	TR [g/kg]	OTR [g/kg]	CSB [g/kg]	BSB <sub>5</sub> [g/kg]	C2 [g/kg]	C3 [g/kg]	IC4 [g/kg]	C4 [g/kg]	IC5 [g/kg]	C5 [g/kg]	NH <sub>4</sub> N [g/kg]	N <sub>ges</sub> [g/kg]
61	8,1	41,7	27	44,7	12	2,1	1,93	0,13	0	0,27	0	5,08	6,22
62	8,5	43,4	28,4	48,9	10,6	1,63	1,69	0,1	0	0,24	0	4,87	6,18
63	8,4	43,5	28,9	51	11,5	2,91	1,72	0,2	0,08	0,25	0,06	4,6	5,8
65	8,5	39,3	24,7	41,8	8,7	1,51	0,51	0,04	0	0	0	3,95	4,89
66	8,2	41,1	26,1	46,1		1,56	2,19	0,16	0	0,2	0	4,46	5,7
69	8,8	54	35,2	69,6	15,7	5,24	2,37	0,42	0,25	0,43	0,15	5,2	6,55
70	7,7	49,1	31,3	65,9	17,9	4,83	2,42	0,39	0,23	0,39	0,15	5,11	6,62
71	7,6	58,5	39,1	70,6		4,22	2,33	0,36	0,19	0,36	0,13	5,25	6,6
74	8,3	29,6	19,4	41,4	12,8	4,58	2,44	0,4	0,29	0,4	0	4,33	4,97
75	7,5	42,9	25,6	58,5	15,2	2,68	1,45	0,22	0,2	0,23	0,07	4,53	5,61
76	7,7	52,4	33,6	71,5	22,8	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	5,51	7,14
85	7,7	53,4	35,7	74	24	4,04	1,97	0,32	0,27	0,31	0,07	5,32	6,86
86	7,6	50,9	33,2	70,3	24,4	4,57	2,23	0,35	0,31	0,54	0,08	5,33	6,85
87	7,7	49,4	32,3	56,4	21,5	2,67	1,36	0,21	0,14	0,33	0,06	5,31	6,79
88	8	49,1	30,4	55,2	13,3	1,58	1,16	0,17	0,03	0,27	0,04	5,31	6,78
90	8	42,2	25,1	46,8	9,7	1,24	1,41	0,17	0	0,26	0,02	4,63	5,82
91	8	41,9	23,2	43,4	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	4,41	5,5
107	8,9	65,9	42,6	100,4	n.b.	4,86	1,35	0,41	0,9	0,5	0,18	6,69	8,95
111	7,8	65		112,6	43,6	11,08	3,55	1	2,21	1,22	0	7,6	9,85
112	7,9	61	39,5	110,5	40,8	11,79	3,29	0,98	2,09	1,16	0	7,74	9,59

n.b.: nicht bestimmt, C2: Essigsäure, C3: Propionsäure, IC4: Iso-Buttersäure, C4: Buttersäure, IC5: Iso-Valeriansäure, C5: Valeriansäure

### 3.2 Versuchsanlagen

#### 3.2.1 Versuchsanlage für Versuche im batch- und halbtechnischen Maßstab

Die für die Belüftungsversuche eingesetzte Versuchsanlage (Abb. 3.1) bestand aus einem Vorlagebehälter (1), dem Bioreaktor (2), einer Wiegeeinrichtung (3), einem Auffangbehälter (4) sowie einer Abluftwäsche mit schwefelsaurer Waschlösung (5) und einem Salzabscheider (6). Zur Verbesserung der Homogenität wurde die separierte Schweinegülle im Vorlagebehälter (Vol.= 1 m<sup>3</sup>) über eine zeitabhängige, selbsttätige Regelung vor der Entnahme mit einer Pumpe (P2) umgewälzt. Entnahme und Umwälzung erfolgte im Regelfall einmalig (batch-Versuche) bzw. einmal täglich (quasikontinuierliche Versuche). Die Befüllung des Bioreaktors (Vol.= 1,1 m<sup>3</sup>, Höhe: 4 m, Durchmesser: 0,6 m) erfolgte nach der Umwälzung des Vorlagebehälters über eine zeitabhängige und selbsttätige Regelung der Pumpe P3. Diese wurde bei Erreichen des Sollfüllstandes über die Füllstandsschaltung (LIS<sup>+</sup>)

abgeschaltet. Um Überfüllungen bei Fehlfunktionen der Füllstandsschaltung zu vermeiden, wurden nach Auslitterung der Pumpe P3 maximale Pumpenlaufzeiten vorgegeben (KC4). Der Bioreaktor bestand aus Polypropylen (Wandstärke: 4 mm) und war mit einer Isolation von 100 mm Steinwolle ausgestattet, die zum Schutz gegen Verschmutzung und Vernässung zusätzlich mit einer Spanplattenkonstruktion (Wandstärke: 16 mm) verstärkt wurde. Zur Belüftung kam Druckluft zum Einsatz, die über 3 Membranbelüfter der Fa. Roediger (10) am Behälterboden eingebracht wurde. Die Belüftungsrate konnte mit einem Durchflussmesser manuell eingestellt werden. Der Reaktorinhalt wurde über eine Umlaufleitung (9) permanent umgewälzt, um Entmischungs- und Sedimentationsvorgänge zu unterbinden. In der Umlaufleitung wurden Messwerte wie pH-Wert, Leitfähigkeit, Redoxpotenzial, Sauerstoffkonzentration und Temperatur gemessen und registriert. Die Probenahme erfolgte aus dieser Umlaufleitung. Zur Schaumbegrenzung kam ein Schaumzerstörer (7) mit einer Schleuderscheibe (Durchmesser: 0,53 m), die mit einer Umfangsgeschwindigkeit von etwa 20 m/s betrieben wurde, zum Einsatz. Bei elektrischer Überlastung des Schaumzerstörers wurde die Zuluft automatisch unterbrochen ( $E^+$ ). Wegen starker Schaumbildung bei der GÜllebelüftung wurde der Bioreaktor mit maximal 500 l (Belüftungsrate:  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ) bzw. 400 l (Belüftungsrate  $10 - 20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ) gefüllt. Das Nettovolumen lag damit bei 45 % (Belüftungsrate:  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ) bzw. 36 % (Belüftungsrate  $10 - 20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ). Zur Abgasreinigung wurde ein Wäscher eingesetzt, der mit einer schwefelsauren Waschlösung betrieben wurde, um Belastungen der Umgebung zu vermeiden. Die Wäsche war jedoch nicht Gegenstand der Untersuchungen. Die GÜlleentnahme erfolgte über die Pumpe P1 in den Wiegebehälter (3) (Vol.=  $0,5 \text{ m}^3$ ), wobei die kalibrierte Wägeeinrichtung (WIS) nach Erreichen der Sollmenge die Pumpe P1 abschaltete und anschließend den GÜlleabfluss in den Auffangbehälter (4) (Vol.=  $1 \text{ m}^3$ ) sicherstellte.

Bei den quasikontinuierlichen Versuchen lief die Befüllung und Entleerung in folgender zeitlicher Abfolge ab: Nach Ablauf von 24 h (KC1) schaltete die zeitabhängige, selbsttätige Regelung (KC2) sowohl die Entleerungspumpe (P1) als auch die Pumpe P2 für die Umwälzung des Vorlagebehälters (1) an. Nach Abfluss einer voreingestellten Sollmenge in den Wiegebehälter wurde die Pumpe P1 abgeschaltet (WIS) und die fermentierte GÜlle in den Auffangbehälter 4 abgelassen. Nach Ablauf einer weiteren Pausenzeit (KC3), in der die Umwälzung des Vorlagebehälters durch die Pumpe P2 sichergestellt wurde, wurde die Pumpe P3 aktiviert, so dass die Wiederauffüllung erfolgen konnte. Nach Erreichen der voreingestellten Füllstandshöhe schaltete die Füllstandsschaltung (LIS) die Pumpe P3 ab.



### 3.2.2 Demonstrationsanlage

Auf der Grundlage der Ergebnisse der halbtechnischen Versuchsanlage wurde eine Demonstrationsanlage konzipiert und gebaut, die neben einer aerob-thermophilen Belüftung zusätzlich über mechanische Trenneinrichtungen zur Abtrennung von organischem Stickstoff und Phosphat verfügte. Die Demonstrationsanlage (Abb. 3.2) wurde in Cloppenburg-Stapelfeld errichtet und war auf eine Jahreskapazität von 10.000 t ausgelegt. Nach Aufnahme des Regelbetriebes wurde sie über einen Zeitraum von 2 Jahren betrieben.

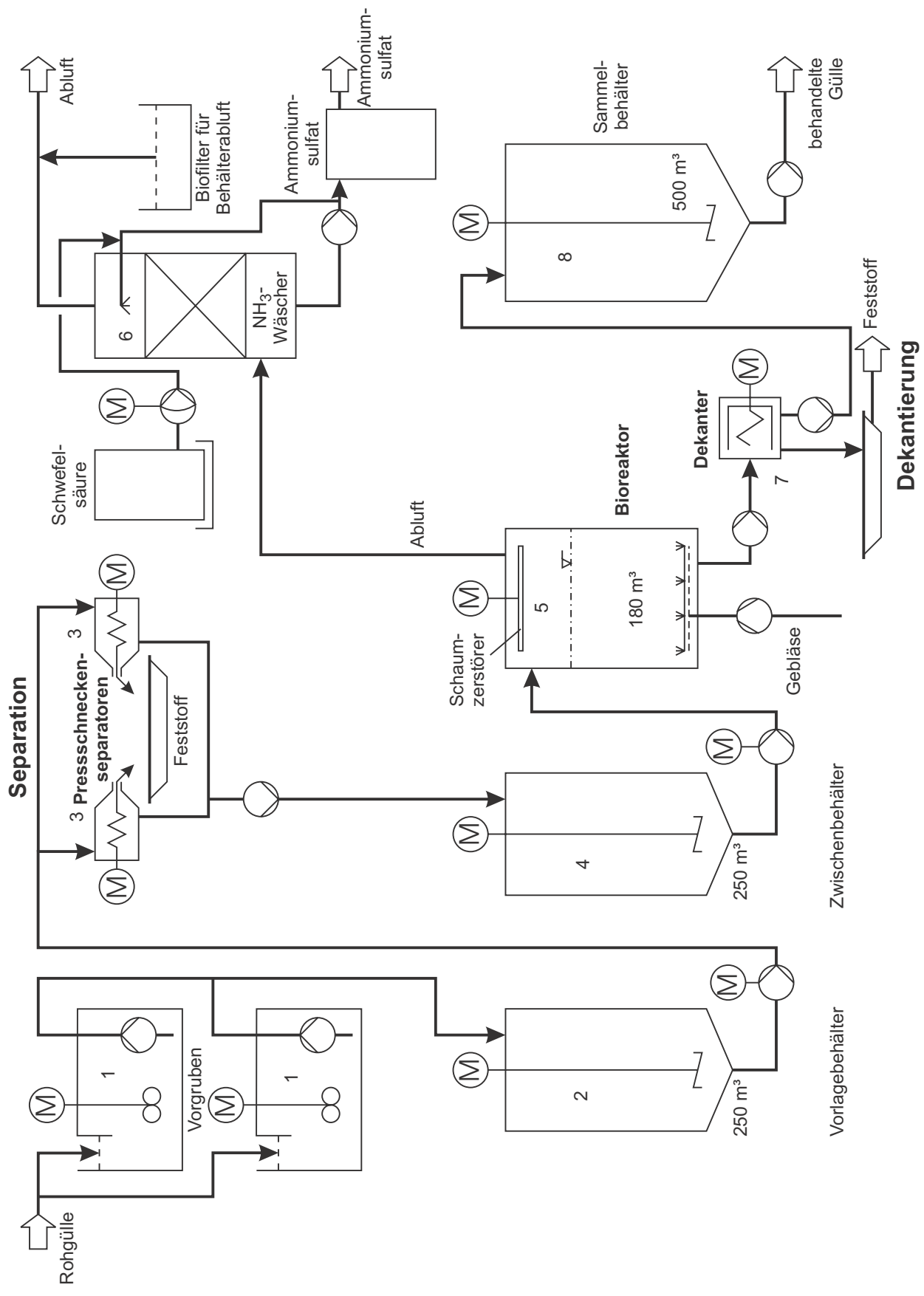


Abb. 3.2: Demonstrationsanlage zur aerob-thermophilen Güllebehandlung mit Maschinenhalle (1), Rohgüllelagerung (2), Lagerung separierter Gülle (3) und Bioreaktor (4)

Die Demonstrationsanlage (Abb. 3.2 und Abb. 3.3) bestand im wesentlichen aus folgenden Prozessstufen:

- Gülleanlieferung und Lagerung,
- Separation und Lagerung,
- Belüftung und Abluftwäsche,
- Zentrifugation belüfteter Gülle und
- Lagerung und Gülleabgabe.





Die angelieferte Gülle wurde zunächst in zwei Sammelgruben mit einem Fassungsvermögen von je 12 m<sup>3</sup> volumenmäßig erfasst (Abb. 3.3 (1)), homogenisiert, beprobt und anschließend in einem Vorlagebehälter (Vol.= 250 m<sup>3</sup>) gelagert (Abb. 3.3 (2)). Dieser diente als Güllepuffer zur Sicherstellung eines Dauerbetriebes bei schwankenden Anlieferungsmengen und zur Vergleichmäßigung der Güllezusammensetzung. Zur Vermeidung von Emissionen war dieser Behälter mit einer Abdeckung versehen. Vor Inbetriebnahme der Separation (Abb. 3.3 (3)) wurde der Behälterinhalt über eine automatisch arbeitende Steuerung 15 – 30 min gerührt.

Zur Separation standen zwei Pressschneckenseparatoren (Fa. FAN) (Abb. 3.3 (3) und Abb. 3.4) zur Verfügung, bei denen Siebe mit unterschiedlichen Spaltweiten (von 0,25 – 1,0 mm) zum Einsatz kamen. Nach manueller Vorauswahl des Separators und Vorgabe einer Sollmenge wurde der Separator automatisch eingeschaltet, nachdem die Homogenisierung der Gülle im Vorlagebehälter abgeschlossen war. Die separierte Gülle wurde im Zwischenbehälter (Vol.= 250 m<sup>3</sup>) (Abb. 3.3 (4)) gespeichert, während die Lagerung der Feststoffe in einem überdachten Lagerplatz erfolgte. Zur Beschickung des Bioreaktors wurde die Gülle im abgedeckten Zwischenbehälter 15 – 30 min gerührt.

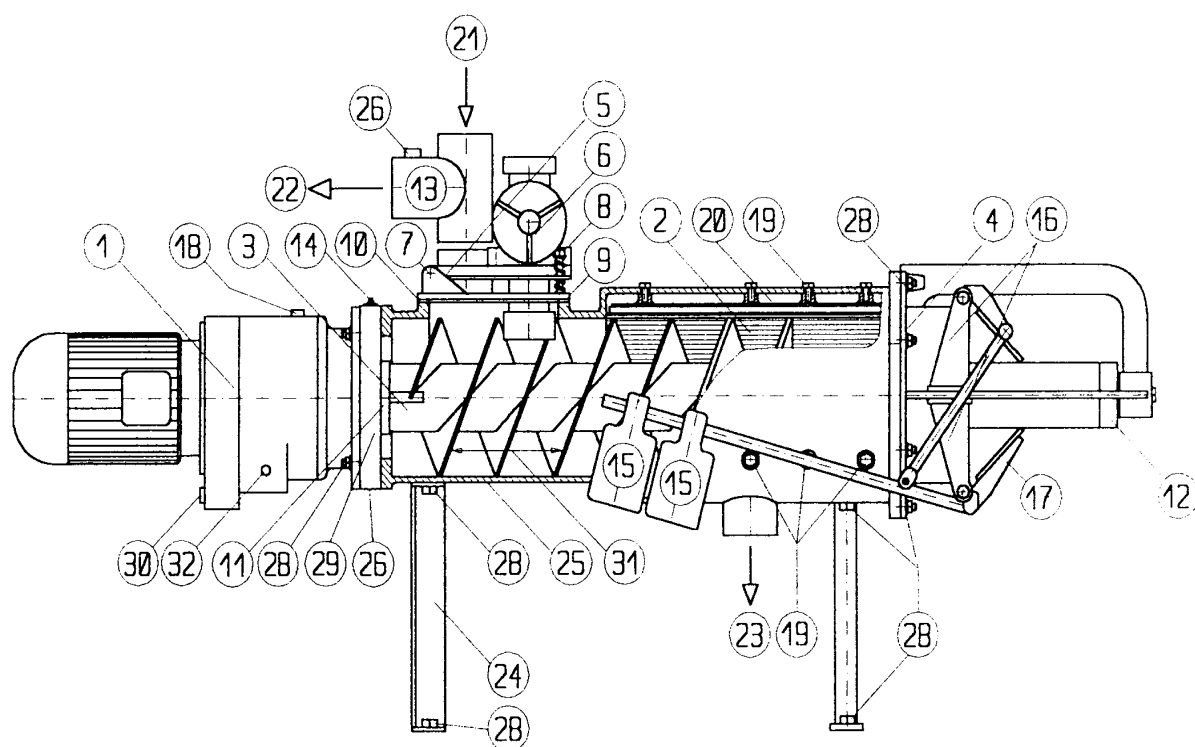


Abb. 3.4: FAN-Presssneckenseparator mit Kopflager (Werkbild FAN)

Bei der Separation gelangt die in den Separator gepumpte Gülle über einen Einlauftrichter (21) in die Vibrationseinheit (5 – 10), die für eine gleichmäßige Beschickung des Pressbereiches sorgt (Abb. 3. 4). Mit der gegen den Uhrzeigersinn rotierenden Pressschnecke (3) wird die Gülle dann in die Druckzone des Separators gepumpt. Die Druckzone besteht aus

einem zylindrisch geformten Sieb und der gehärteten Edelstahl-Pressschnecke. Mit Hilfe eines Feststoffpfropfens am Ende der Pressschnecke wird der erforderliche Widerstand gegen die zu separierende Gülle aufgebaut. Der bei der Separation gebildete Feststoff verbleibt im Inneren des Siebkorbes, während die Dünngülle durch das Sieb gedrückt wird und über den Ablauf (23) das Gerät verlässt. Der Feststoff wird aus dem Mundstück des Separators herausgedrückt. Mit Hilfe eines Ausstoßreglers (15, 16, 17) kann der Anpressdruck und damit der Entwässerungsgrad beeinflusst werden.

Nachdem die Homogenisierung der Gülle im Zwischenbehälter abgeschlossen war, erfolgte die Beschickung des Bioreaktors (Vol.= 180 m<sup>3</sup>) mit separierter Schweinegülle und einer voreingestellten Sollmenge am Kopf des Bioreaktors (Abb. 3.3 (5)). Im Regelbetrieb wurde der Reaktor mit einem Netto-Volumen von 100 m<sup>3</sup> betrieben, 80 m<sup>3</sup> wurden zur Schaumausdehnung vorgehalten. Die Schaumzerstörung erfolgte unmittelbar unterhalb des Abgasaustritts mit einer Schaumzentrifuge (Fundafom, Größe 5, Fa. Mavag). Zur Belüftung wurden feinporige Membranen (Permax-OM-Membranbelüfter, Fa. Suprafilt) eingesetzt, die flächendeckend am Behälterboden eingebaut und auf eine variable Luftmenge von bis zu 2000 m<sup>3</sup>/h ausgelegt waren. Zur Vermeidung von Wärmeverlusten war der Bioreaktor mit einer 160 mm starken Schicht aus Isolierwolle ummantelt und gegen Vernässung zusätzlich mit einer Aluminiumkaschierung ausgestattet.

Das Abgas aus dem Bioreaktor wurde in einer zweistufigen Wäsche mit schwefelsaurer Waschlösung (Fa. QVF Glastechnik) (Abb. 3.3 (6)) gereinigt und anschließend über Dach abgeleitet. Als Waschmedium kam Schwefelsäure (96 %) zum Einsatz, die in der Waschkolonne 2 durch Zugabe von Wasser in einem festen Verhältnis auf 28 % verdünnt wurde. Bei Überschreitung eines voreingestellten pH-Wertes in der Waschkolonne 1 wurde Schwefelsäure aus der Waschkolonne 2 nachdosiert. Die Produktausschleusung der bis zur Sättigung konzentrierten Ammoniumsulfatlösung erfolgte aus dem Sumpf der Waschkolonne 1 in einen Auffangbehälter. Die technischen Daten der Abgaswäsche sind in Tab. 3.4 zusammengefasst. Zur Vermeidung von Wasser-Kondensationen wurden beide Waschkolonnen mit einer Isolierung und einer Heizung ausgestattet, die die Waschwassertemperatur um 2 °C über der Abgastemperatur hielt.

Tab. 3.4: Technische Daten der zweistufigen Abluftwäsche

Gasbeladung	2000 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·h)
Gasgeschwindigkeit	0,55 m/s
Füllkörperschüttung	PP-Ringe, spez. Oberfläche: 125 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Höhe der Schüttung	2,14 m (je Kolonne)
Füllkörpervolumen	1,08 m <sup>3</sup> (je Kolonne)
Waschwasserkreislaufstrom	12 – 14 m <sup>3</sup> /h
Berieselungsdichte	24 – 28 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·h)

Zur Abtrennung des Phosphates und organisch gebundenen Stickstoffs wurde die belüftete Gülle mit einem Dekanter der Fa. Westfalia (Abb. 3.3 (7), Abb. 3.5) zentrifugiert. Die Dekanterbeschickung erfolgte direkt aus dem Reaktor ohne weitere Zwischenlagerung.

Bei der Dekantierung wird das Schleudergut über ein Einlaufrohr in den Dekanter und über einen Verteiler in den Separationsraum gefördert. Die Niveauhöhe des Flüssigkeitsspiegels ist durch Regulierringe einstellbar. Feststoffteilchen werden durch die Zentrifugalkraft an die Trommel geschleudert, durch die Schnecke in den Konusteil der Schnecke gefördert, entwässert und über den Austrag ausgetragen. Die anfallenden Feststoffe wurden zusammen mit den separierten Feststoffen auf einer überdachten Lagerfläche gelagert. Zur optimalen Funktion liegt die Drehzahl der Schnecke etwas höher als die Drehzahl der Trommel. Die zentrifugierte Flüssigkeit läuft über den Ablauf drucklos ab. Bei Trommeldrehzahlen von  $2000 - 3400 \text{ min}^{-1}$  wurden Zentrifugalbeschleunigungen von  $1025 - 2960 \text{ m/s}^2$  erreicht. Die Gülledurchsätze lagen bei  $10 - 12 \text{ m}^3/\text{h}$ .

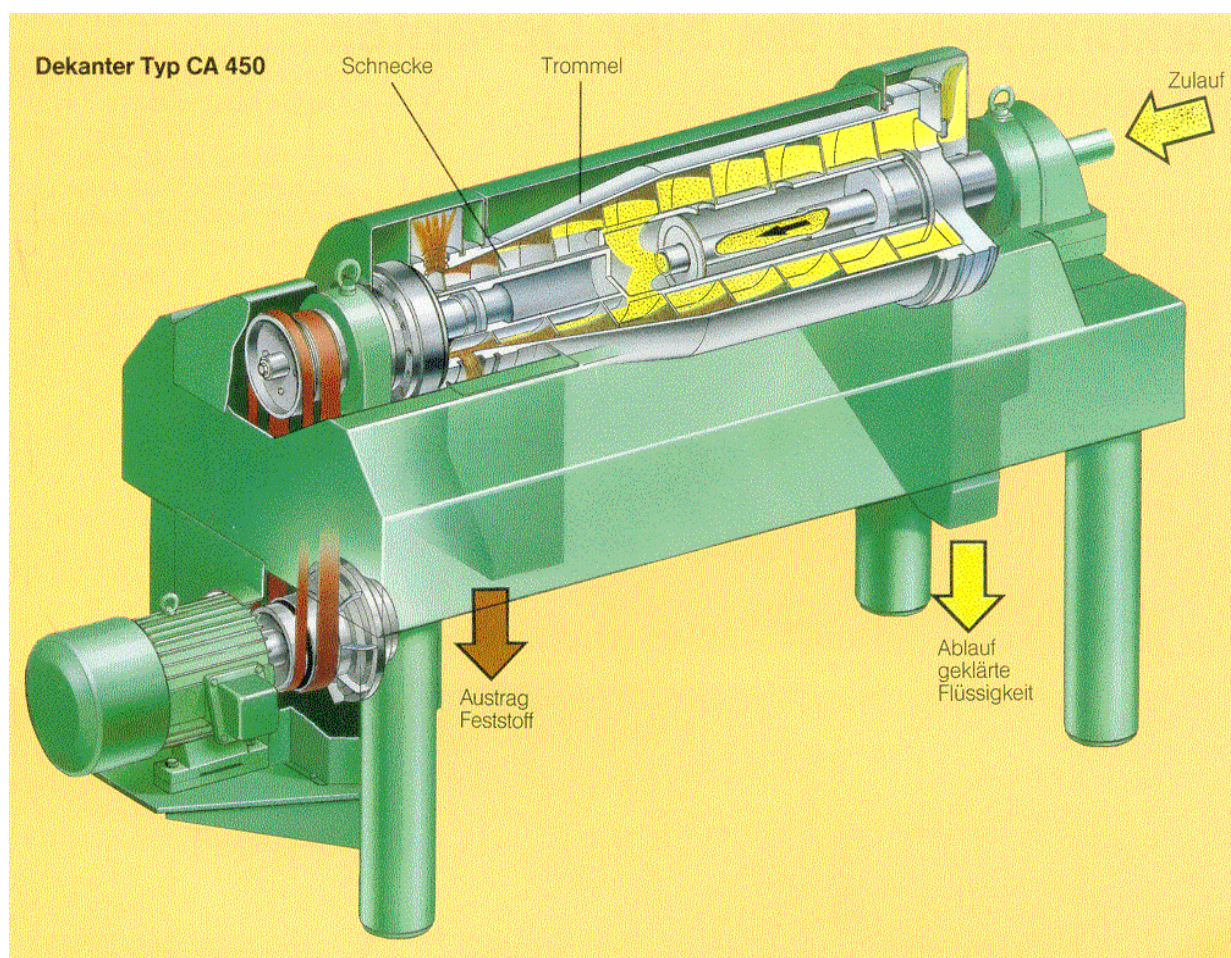


Abb. 3.5: Westfalia Dekanter CA 450, Werkbild

### 3.3 Analyse-Verfahren

Zur Bestimmung der Güllezusammensetzung sowie physikalisch/chemischer Eigenschaften wurden die in der Tab. 3.5 genannten und im Anhang (Kap. 8.2, S.198ff.) näher beschriebenen Verfahren eingesetzt. Die nasschemischen Analysen wurden aus der gemischten Probe bestimmt. Der Nitrit- und Nitratsnachweis erfolgte aus der zentrifugierten Probe.

Tab. 3.5: Eingesetzte Analyseverfahren zur Untersuchung von Gülle

Parameter	Messverfahren
Temperatur	DIN 38404 – C4*, Thermoelemente, PT 100
pH-Wert	DIN 38404 – C5*, WTW 96, E 50
Leitfähigkeit	EN 27888*, WTW LF 95, Tetra Con 96
Redoxspannung	DIN 38404 – C6*, WTW 96, PT 4805
Gelöstsauerstoff	EN 25814*, WTW Oxi 521, EO 166
Sauerstoff, Luft	Paramagnetisch, Siemens Oxymat 2
Kohlendioxid, Luft	IR-Spektroskopisch, Maihak Unor 6 N
Trockenrückstand (TR)	DIN 38414 – S2*
Organischer Trockenrückstand (OTR)	DIN 38414 – S3*
Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)	Küvettest nach Fa. Dr. Lange, Düsseldorf, LCK 114, in Anlehnung an DIN 38409 – H 41-1
Biochemischer Sauerstoffbedarf (BSB <sub>5</sub> )	EN 1899 – 1*
Flüchtige organische Säuren	HPLC, Shimadzu
Ammoniumstickstoff	DIN 38406 – E5-2*, modifiziert
Nitritstickstoff	Küvettest nach Fa. Dr. Lange, Düsseldorf, LCK 341, in Anlehnung an EN 26777*
Nitratstickstoff	Küvettest nach Fa. Dr. Lange, Düsseldorf, LCK 339, in Anlehnung an DIN 38405 – D9-2*
Kjeldahl-Stickstoff	EN 25663*
Gesamt-Phosphat	Fa. Dr. Lange, LCK 049, nach Aufschluss mit Aufschlussgerät KB 20 S, Fa. Gerhardt, Bonn

\* Fachgruppe Wasserchemie in der Gesellschaft Deutscher Chemiker (Hrsg.): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlamm-Untersuchung. Beuth Verlag Berlin, jeweils in der gültigen Fassung

Alle nasschemischen Analysenergebnisse beruhen auf Mittelwerten von mindestens zwei Einzelbestimmungen. Bei der Bestimmung des gemischten CSB wurden vielfach drei Einzelbestimmungen durchgeführt.

Die mikrobiologischen Untersuchungen wurden vom Institut für Umwelt- und Tierhygiene der Universität Hohenheim durchgeführt. Zur Bestimmung bakteriologischer Parameter wurden nach Fink [64] folgende Verfahren eingesetzt:

**Gesamtkeimzahl (GKZ):** Herstellung von Verdünnungsreihen in physiologischer NaCl-Lösung, Ausplattieren von je 0,1 ml jeder Verdünnungsstufe in 2 Parallelen auf Standard-I-Agar, Bebrütung über 24 h bei 37 °C, anschließende Auszählung der Platten, bei denen zwischen 10 und 100 Keimen gewachsen waren.

**Enterobakterien (EBA):** Herstellung von Verdünnungsreihen mit Mac Conkey-Bouillon, Bebrütung über 24 h bei 37 °C, Ausplattieren jeder Verdünnungsstufe auf Mac Conkey – und VRBD-Agar, Bebrütung über 24 h bei 37 °C, Auszählung nach MPN-Methode, Test der gewachsenen Kulturen auf Kligler Agar und Cytochrom-Oxidase-Test.

Fäkalstreptococcen (FKS): Herstellung von Verdünnungsreihen in AD-Bouillon, Bebrütung über 48 h bei 37 °C, Ausplattieren jeder Verdünnungsstufe auf Kanamycin-Äsculin-Agar, Bebrütung über 48 h bei 37 °C, serologischer Test gewachsener Kulturen auf Streptococcen. E.coli: Herstellung von Verdünnungsreihen, Ausplattieren auf Tergitol- und Endo-Agar, Bebrütung über 24 h bei 43 °C, Identifizierung über Plättchentest.

Salmonellen: Erstellung von Verdünnungsreihen in Pepton-Wasser zur Voranreicherung, Bebrütung über 24 h bei 37 °C, Überimpfung von jeweils 0,1 ml jeder Verdünnungsstufe in Rappaport-Bouillon (a 10 ml), Bebrütung über 24 h bei 37 ° und 43 °C, Ausplattieren auf XLD- und BPLA-Agar, Bebrütung über 24 h bei 37 °C, Nachweis von Salmonellen bei gewachsenen Kulturen über serologischen Test.

Die virologischen Untersuchungen wurden nach Winter [65] folgendermaßen durchgeführt: Anzucht der Virussuspension in Zellkulturflaschen mit Zellrasen, Zellkulturmedium, fötalem Kälberserum und Antibiotikazusätzen, Bebrütung bei 37 °C, Aufreinigung durch Gefriertauen und Abzentrifugieren, Lagerung bei – 80 °C. Befüllung von Ampullen mit den aufgetauten Virussuspensionen bekannten Titer, Inkubation im Bioreaktor in Braunschweig, Entnahme der Ampullen nach entsprechender Inkubationszeit. Die Auswertung erfolgte über die Beimpfung von Well-Mikrotiterplatten, in deren Vertiefungen ein entsprechender Zellrasen mit Zellkulturmedium vorgehalten wurde. Dabei wurde die Virensuspension in dekadischer Verdünnung auf das Testsystem aufgebracht. Sofern bei entsprechender Verdünnung noch lebensfähige Viren vorhanden sind, tritt ein cytopathischer Effekt auf, der lichtmikroskopisch sichtbar ist. Der Titer wurde nach einer 5-tägigen Bebrütung bei 37 °C bestimmt.

Alle Gleichungen zur Ermittlung von Trendlinien wurden mit Microsoft EXCEL 97 berechnet. Als Maß für die Güte der Regression wurde das Bestimmtheitsmaß verwendet, dass ebenfalls mit Microsoft EXCEL 97 berechnet wurde. Die Erstellung von Graphiken erfolgte mit Harvard Graphics 98.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 batch-Versuche

Mit der in Kap. 3 beschriebenen Versuchsanlage wurden insgesamt 41 batch-Versuche mit Belüftungsraten von 5, 10 und 20  $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  über jeweils 100 h durchgeführt. Durch die große Zahl der Versuche sollte die natürliche Schwankungsbreite der stofflichen Zusammensetzung der Schweinegülle (Tab. 3.1), bedingt durch Fütterung, Stallmanagement, Fremdwassereintrag, jahreszeitliche Einflüsse und Alter der Gülle, im Rahmen der Untersuchungen auch erfasst werden. Zur besseren Übersichtlichkeit der Ergebnisse wurde die Zahl der dargestellten Versuche je Graphik begrenzt. Bei mehr als 6 Versuchen bei einer Belüftungsrate wurden die Graphiken in alphabetischer Reihenfolge (a, b, c, d) unterteilt. Ferner wurde aufgrund der stark unterschiedlichen Ausgangskonzentrationen im Regelfall eine prozentuale Darstellung gewählt.

#### 4.1.1 pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit

Die pH-Werte der separierten Schweinegülle, die mit einer Belüftungsrate von 5  $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  belüftet wurden, lagen zu Versuchsbeginn zwischen 7,55 und 8,22. Nach Einschalten der Belüftung trat bei allen Versuchen ein starker pH-Wertanstieg auf (Abb. 4.1 a und b), der auf die Strippung nicht gebundenen Kohlendioxids zurückzuführen ist. Nach der  $\text{CO}_2$ -Strippung stieg der pH-Wert weiter an, allerdings mit deutlich geringerer Geschwindigkeit. In diesem Zeitabschnitt fand im wesentlichen der Abbau der organischen Säuren statt, der dementsprechend als Ursache des weiteren pH-Wertanstiegs anzusehen ist. Durch den Säureabbau wurde Kohlensäure gebildet, die bei den vorliegenden pH-Werten im wesentlichen als Hydrogencarbonat vorlag. Dieses konnte die durch die Strippung des Ammoniaks frei werdenden Protonen neutralisieren. Die höchsten pH-Werte innerhalb der Versuche wurden nach 80 h mit 9,68 (V50) bzw. nach 72 h mit 9,79 (V149) erreicht.

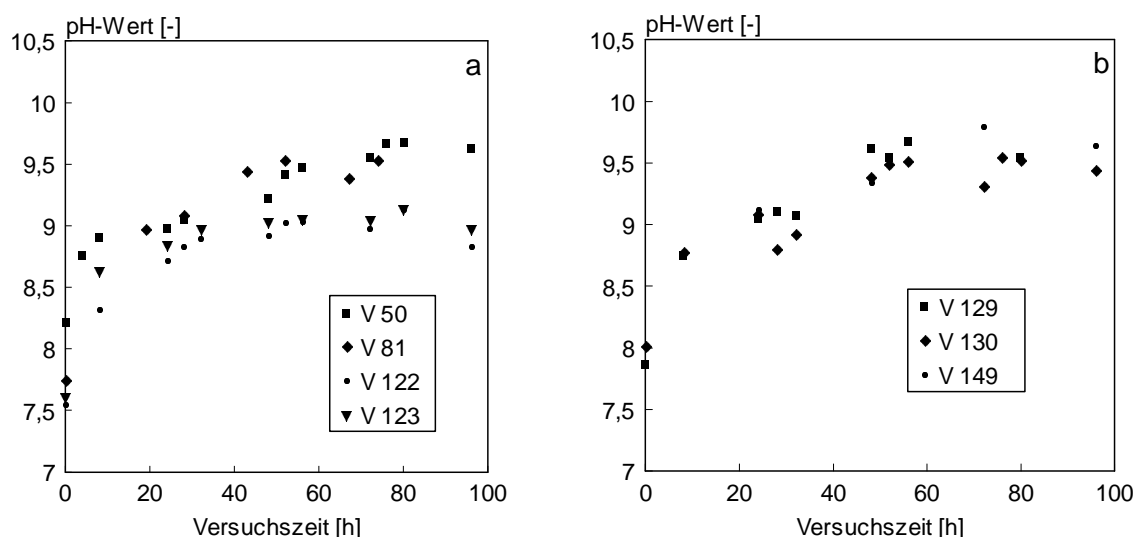


Abb. 4.1 a und b: pH-Wertverlauf bei der Belüftung von separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 5  $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$

Nach Überschreiten des pH-Maximums setzte bei fast allen Versuchen ein leichter pH-Wertabfall ein. Dieser pH-Wertabfall lässt sich mit der anhaltenden Ammoniakstrippung, die

zur Protonenfreisetzung führt, erklären. In diesem Versuchsabschnitt war der Abbau der organischen Säuren jedoch bereits weitgehend abgeschlossen, so dass keine Nachlieferung von Kohlensäure und damit auch keine pH-Wertpufferung mehr erfolgte.

Bei Belüftungsraten von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  wurde in der Tendenz ein ähnlicher pH-Wertverlauf beobachtet (Abb. 4.2 a - c) wie bei den Versuchen mit einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ . Die pH-Werte in den Ausgangsgüllen schwankten zwischen 7,51 und 8,62. Sie stiegen nach Einschalten der Belüftung stark an und erreichten nach 48 bis 96 h mit Werten von 9,25 (V52) bis 10,16 (V152) ihr Maximum. Gegen Versuchsende trat in der Mehrzahl der Versuche wieder ein leichter pH-Wertabfall auf.

Abgesehen von den Versuchen 53, 124, 126 und 133 wurde bei allen Versuchen mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  ein mit den anderen Belüftungsraten vergleichbarer pH-Wertverlauf ermittelt (Abb. 4.3 a, b, c und d). In den Ausgangsgüllen lagen die pH-Werte zwischen 7,26 und 8,66. Die maximalen pH-Werte wurden je nach Versuch nach 48 h (V121) bzw. 74 h (V47) erreicht. Sie bewegten sich zwischen 9,5 (V120) und 9,92 (V121).

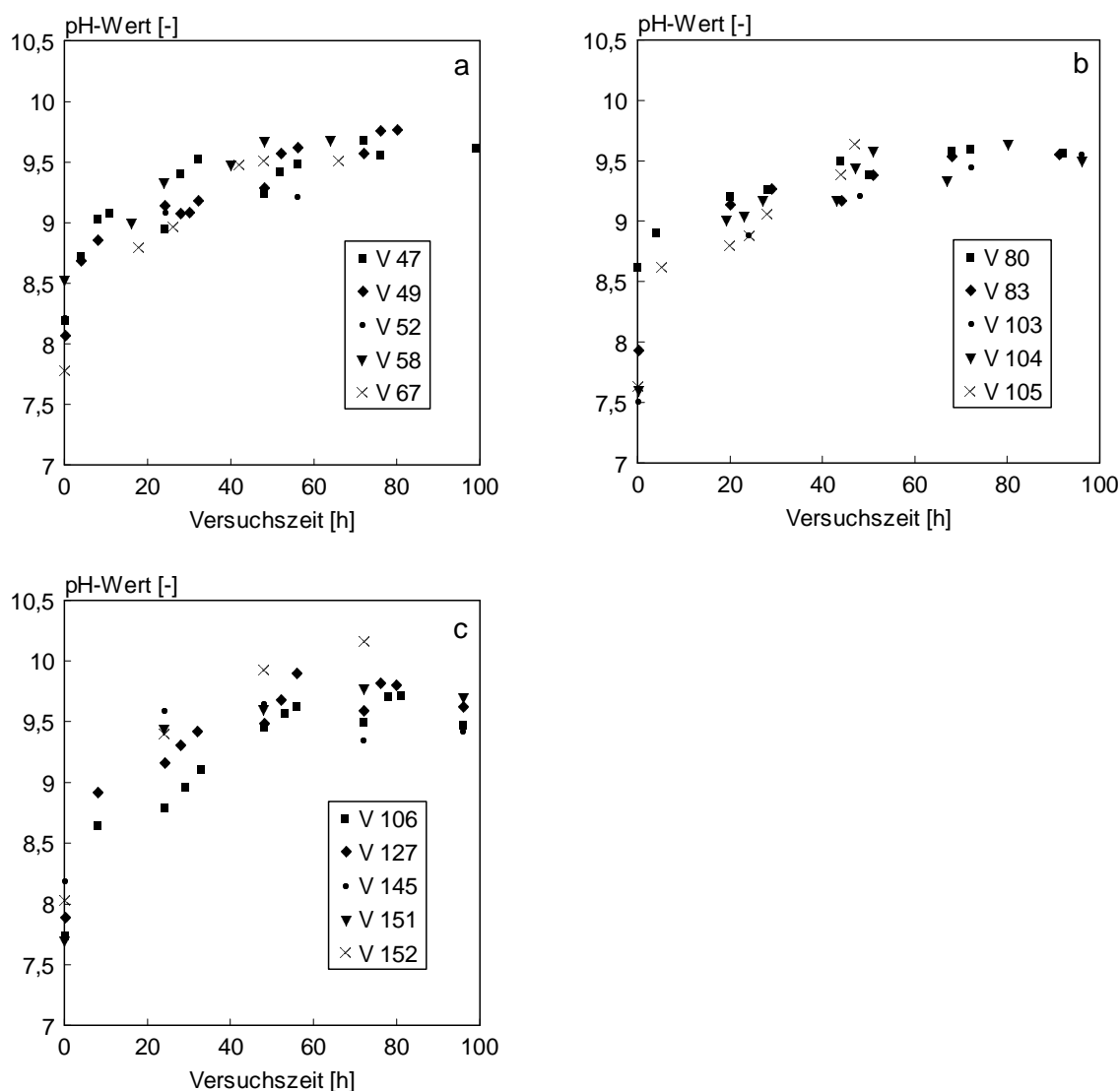


Abb. 4.2 a, b, c: pH-Wertverlauf bei der Belüftung von separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$



Ein Vergleich der Versuche 129 und 130 (BLR: 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup> h)), 67, 103 und 127 (BLR: 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup> h)) sowie 117, 119 und 128 (BLR: 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup> h)) zeigt den Einfluss der Belüftungsrate auf den pH-Wertanstieg bei vergleichbaren TR-Konzentrationen von 61 – 68 g/kg (Abb. 4.4). Die pH-Wertanstiege bei Versuchen mit gleicher Belüftungsrate wurden jeweils gemittelt. Insbesondere in den ersten Versuchsstunden stieg der pH-Wert um so stärker, je höher die Belüftungsrate gewählt wurde. Bei Belüftungsraten von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) wurden im gesamten Versuchsablauf geringere pH-Werte erzielt als bei höheren Belüftungsraten. Belüftungsraten von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) ergaben erst gegen Versuchsende pH-Werte, wie sie mit Belüftungsraten von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) erzielt wurden.

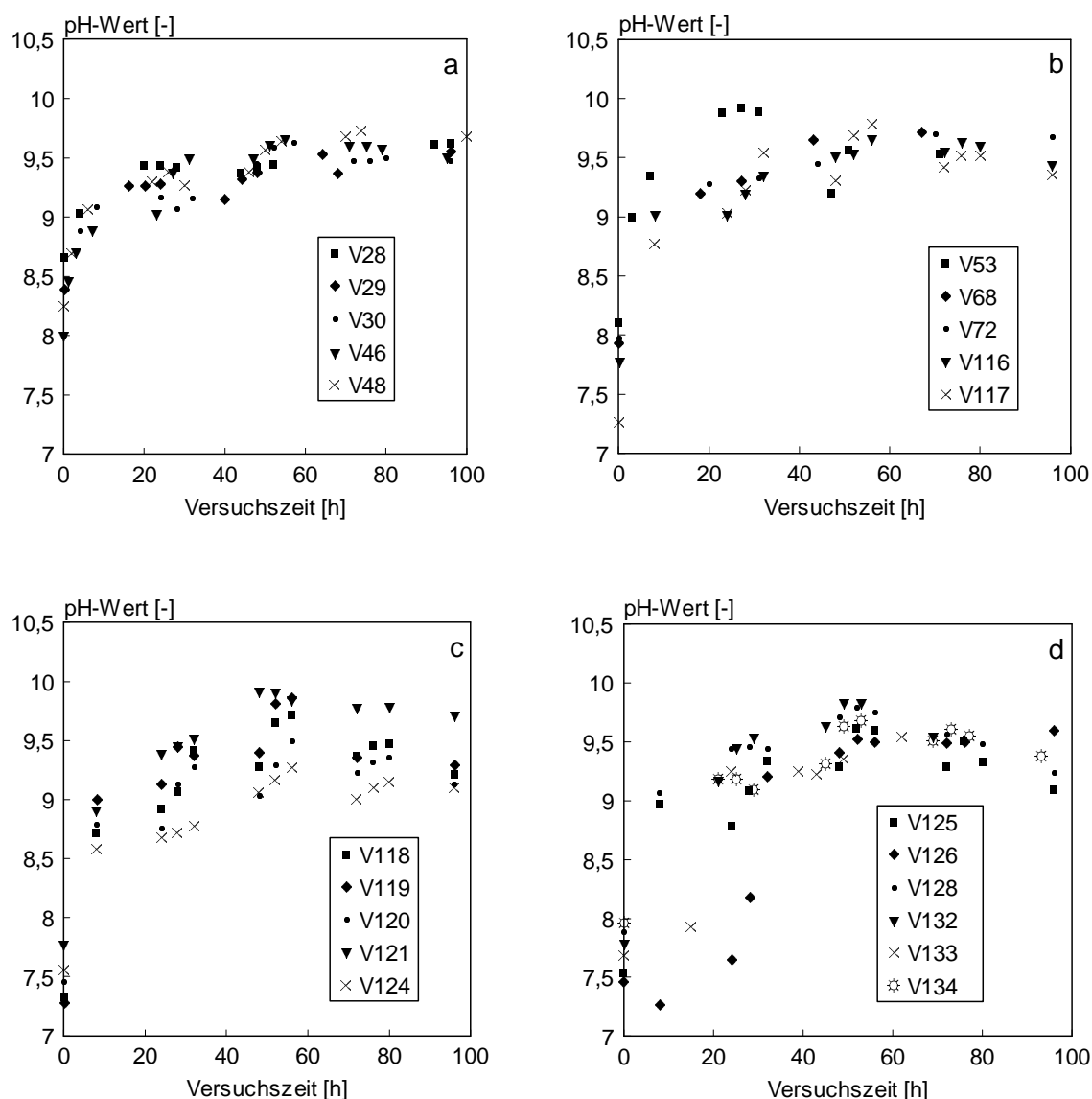


Abb. 4.3 a, b, c und d: pH-Wertverlauf bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

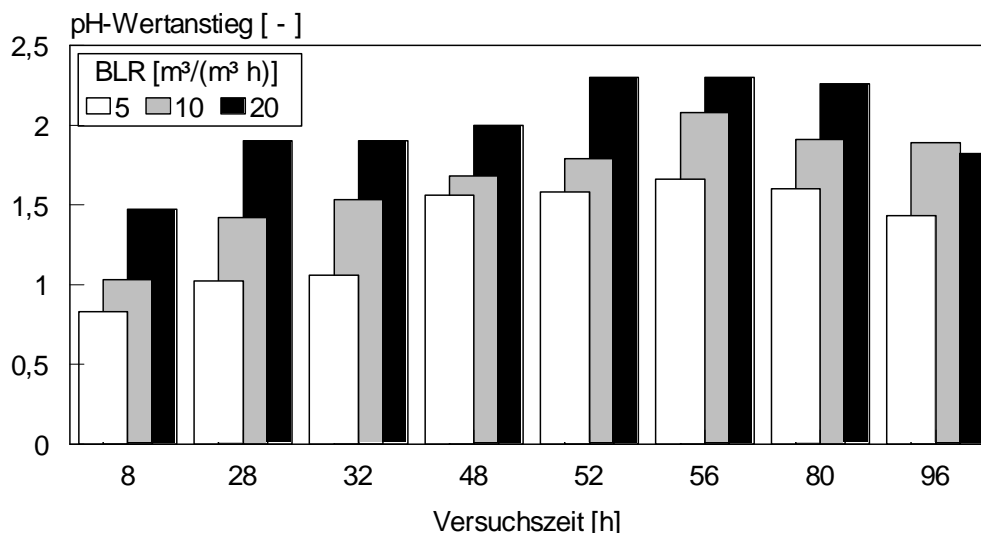


Abb. 4.4: Abhängigkeit des pH-Wertanstiegs von der Belüftungsrate bei der Belüftung von separierter Schweinegülle

Darüber hinaus ist der Verlauf des pH-Wertes bei einer konstanten Belüftungsrate auch von der TR-Konzentration abhängig (Abb. 4.3 c). Versuche mit hoher TR-Konzentration (V 124: 105,7 g/kg) ergaben deutlich niedrigere pH-Werte über den gesamten Versuchszeitraum als Versuche mit geringen TR-Konzentrationen (V 121: 23,9 g/kg). Um die Bedeutung der TR-Konzentration auf die pH-Wertentwicklung über die Versuchszeit (x) bei der Belüftung quantifizieren zu können, wurden für alle Versuche mit einer Belüftungsrate von 20 m³/(m³·h) logarithmische Funktionsanpassungen errechnet. Die Funktionsgleichungen für vergleichbare TR-Konzentrationen wurden gemittelt (Tab. 4.1). Werden die mit diesen Funktionsgleichungen errechneten pH-Werte gegen die TR-Konzentrationen aufgetragen und eine erneute Kurvenanpassung durchgeführt, lassen sich für beliebige TR-Konzentrationen die sich bei der Belüftung ergebenen pH-Werte berechnen und graphisch darstellen (Abb. 4.5).

Tab. 4.1: Berechneter pH-Wertverlauf in Abhängigkeit der TR-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 20 m³/(m³·h)

TR-Bereich [g/kg]	n	TR, Mittel [g/kg]	Funktionsgleichung
20 – 29,9	1	23,9	$\text{pH} = 0,4643 \cdot \ln(x) + 7,89$
30 – 39,9	5	34,0	$\text{pH} = 0,2990 \cdot \ln(x) + 8,30$
40 – 49,9	4	48,3	$\text{pH} = 0,4230 \cdot \ln(x) + 7,81$
50 – 59,9	1	58,5	$\text{pH} = 0,4330 \cdot \ln(x) + 7,93$
60 – 69,9	4	64,6	$\text{pH} = 0,4284 \cdot \ln(x) + 7,77$
70 – 79,9	1	76,2	$\text{pH} = 0,4628 \cdot \ln(x) + 7,54$
80 – 89,9	1	88,6	$\text{pH} = 0,3880 \cdot \ln(x) + 7,68$
90 – 99,9	-	-	-
100 – 109,9	1	105,7	$\text{pH} = 0,3480 \cdot \ln(x) + 7,66$

n: Anzahl der Versuche

Die Berechnungen zeigen, dass bei allen TR-Konzentrationen die pH-Werte mit der Belüftungszeit ansteigen. Der Anstieg verläuft mit zunehmenden TR-Konzentrationen jedoch flacher (Abb. 4.5). Während bei TR-Konzentrationen von 20 g/kg nach 10 h Belüftungszeit pH-Werte von 9 und nach 70 h von 9,72 erreicht werden, führen TR-Konzentrationen von 100 g/kg zu deutlich geringeren pH-Werten (8,49 nach 10 h, 9,22 nach 70 h).

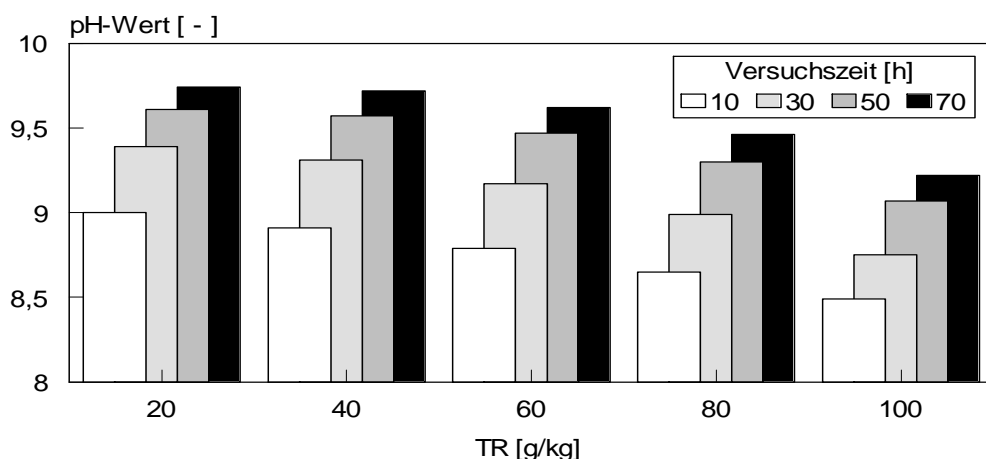


Abb. 4.5: Einfluss der TR-Konzentration auf den pH-Wertverlauf bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

Mit steigenden TR-Konzentrationen nimmt der Anteil an organischem Material, das versäuert werden kann, zu. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass der Sauerstoffeintrag mit wachsenden TR-Konzentrationen abnimmt. Beides dürfte zu einer verstärkten Versäuerung führen, die sich an sinkenden pH-Werten ablesen lässt. Diese auf den ersten Blick geringfügigen pH-Wertunterschiede haben – insbesondere bei geringen Gülletemperaturen in den ersten Belüftungsstunden – einen erheblichen Einfluss auf die strippbare Ammoniakkonzentration. Bei TR-Konzentrationen von 23,9 g/kg, einer Gülletemperatur von 31,4 °C und einem pH-Wert von 9 (nach 10 h Belüftungszeit) würden 47,1 % des Ammoniums als Ammoniak vorliegen. Streng genommen gilt das hier zugrundegelegte NH<sub>3</sub>/NH<sub>4</sub>-Dissoziationsgleichgewicht (Anthonisen et al.[61])

$$\text{NH}_3\text{N} = \text{NH}_4\text{N} \cdot 10^{\text{pH}} / (\exp(6344/T) + 10^{\text{pH}})$$

nur für reines Wasser. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Konzentration an freiem Ammoniak in Gülle wegen vielfältiger Adsorptionseffekte eher noch niedriger ist. Demgegenüber lägen bei einer TR-Konzentration von 105,7 g/kg bei 23,6 °C und einem pH-Wert von 8,49 nach 10 h Belüftungszeit nur 13,7 % des Ammoniums als strippbares Ammoniak vor (Tab. 4.2). Die Berechnungen zeigen ferner, dass bei sehr hohen TR-Konzentrationen der Anteil an strippbarem Ammoniak über die gesamte Versuchsdauer unter 80 % bleibt, während bei geringen TR-Konzentrationen Werte von mehr als 90 % erreicht werden. Dementsprechend wurden innerhalb von 70 h bei dem Versuch 121 66 % des Ammonium-Stickstoffs eliminiert, während es bei dem Versuch 124 lediglich 33 % waren.

Tab. 4.2: Einfluss des Trockenrückstandes auf Temperatur, pH-Wert und Konzentration an stripbarem Ammoniak bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

Zeit [h]	V 121 (TR= 23,9 g/kg)			V 124 (TR= 105,7 g/kg)		
	T [K]	pH [ - ]	NH <sub>3</sub> [%]	T [K]	pH [ - ]	NH <sub>3</sub> [%]
10	304,4	9,00	47,1	296,6	8,49	13,7
20	314,3	9,27	76,1	302,4	8,76	30,8
30	324,3	9,39	88,7	309,2	8,75	40,9
40	323,1	9,53	91,5	316,9	9,03	68,4
50	319,0	9,61	90,3	322,9	9,07	77,5
60	316,0	9,68	90,1	316,2	9,17	74,1
70	314,0	9,74	90,2	313,4	9,22	72,9

Die elektrische Leitfähigkeit nahm in der Mehrzahl der 7 Versuche, die mit einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  durchgeführt wurden, kontinuierlich ab (Abb. 4.6 a und b). Nach 96 h Belüftungszeit war die Leitfähigkeit um 18,5 (V123) bis 55,9 % (V149) reduziert. Bei separierten Schweinegülle mit hohen Feststoffkonzentrationen wurde jedoch zunächst ein starker Anstieg der Leitfähigkeit beobachtet (V129, V130). Die mit Hilfe einer exponentiellen Regression ermittelten Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten (Tab.4.3.) bewegten sich je nach erreichter Maximaltemperatur zwischen 0,0027/h und 0,0098/h.

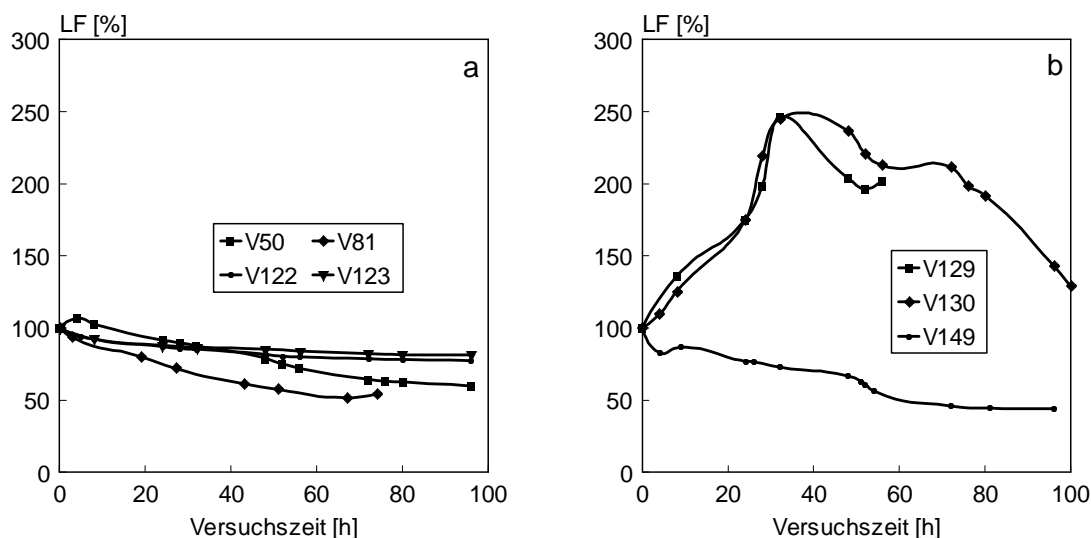


Abb. 4.6 a und b: Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit bei der Belüftung von separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$

Tab. 4.3: LF-Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$

V-Nr	LF,o [mS/cm]	Zeitintervall [h]	Zahl der Messpunkte	k [1/h]	r <sup>2</sup>	T, max [°C]
50	23,8	0 – 96	13	0,0055	0,95	54,9
81	33,8	0 – 74	8	0,0098	0,94	60,8
122	17,0	0 – 96	12	0,0034	0,68	49,4
123	26,0	0 – 96	9	0,0027	0,60	48,3
129	20,1	n. a.				
130	25,2	n. a.				
149	30,6	0 – 96	13	0,0096	0,94	71,3

n. a. : nicht ausgewertet

Bei Belüftungsraten von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  wurden bei insgesamt 13 Versuchen Leitfähigkeitsmessungen durchgeführt (Abb. 4.7 a, b und c). Mit Ausnahme des Versuchs 127, bei dem hohe Feststoffkonzentrationen vorlagen, ging die Leitfähigkeit bei allen Versuchen kontinuierlich zurück. Nach 96 h Belüftungszeit war die Leitfähigkeit um 50,7 (V106) bis 79,8 % (V103) reduziert. Die Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten (Tab.4.4) lagen je nach erreichter Maximaltemperatur zwischen 0,007/h (V47) und 0,0144/h (V145) und damit deutlich über denen, die mit einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  errechnet wurden.

Tab. 4.4: LF-Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten bei der Belüftung von separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

V-Nr	LF <sub>o</sub> [mS/cm]	Zeitintervall [h]	Zahl der Messpunkte	k [1/h]	r <sup>2</sup>	T, max [°C]
47	18,9	0 – 56	5	0,0070	0,93	56,5
49	27,4	0 – 79	14	0,0101	0,97	55,3
52	28,1	n. a.				
58	30,7	0 – 65	7	0,0130	0,95	52,5
83	33,0	0 – 74	8	0,0109	0,96	62,4
103	40,2	0 – 96	5	0,0119	0,73	66,4
104	42,2	0 – 96	10	0,0880	0,94	68,6
105	25,6	0 – 48	7	0,0090	0,91	64,1
106	14,6	0 – 96	12	0,0081	0,93	46,5
127	19,1	n. a.				
145	32,2	0 – 96	10	-0,0144	0,71	72,8
151	32,5	0 – 96	9	-0,0144	0,70	70,0
152	28,3	n. a.				

n. a. : nicht ausgewertet

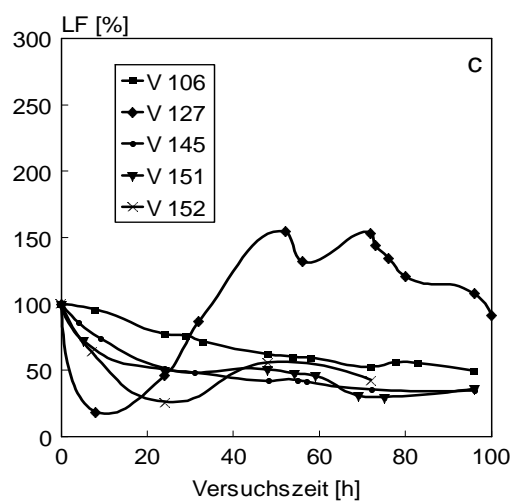
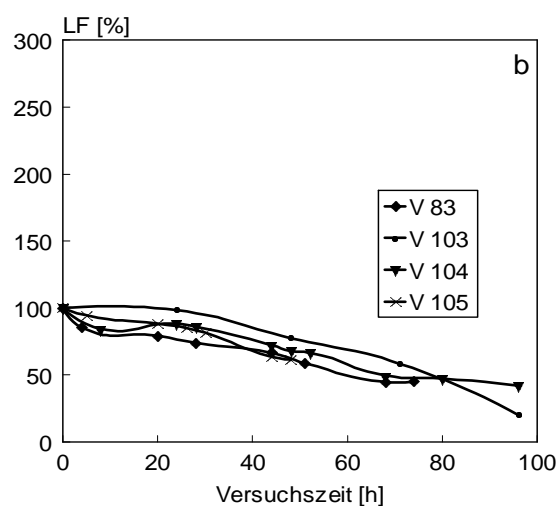
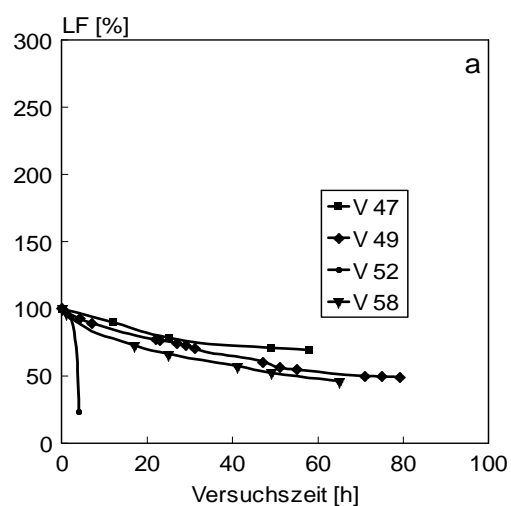


Abb. 4.7 a, b und c: Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit bei der Belüftung von separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

Bei Belüftungsraten von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  wurden bei 17 Versuchen Leitfähigkeitsmessungen durchgeführt (Abb. 4.8 a, b und c). Abgesehen von den Versuchen 125 und 128, wo hohe Feststoffkonzentrationen vorlagen und dem Versuch 126, nahm die Leitfähigkeit mit der Belüftungszeit kontinuierlich ab. Nach 96 h Belüftungszeit war die Leitfähigkeit um 46,7 (V72) bis 64,4 % (V118) reduziert. Die Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten (Tab. 4.5) bewegten sich je nach erreichter Maximaltemperatur zwischen  $0,0083/\text{h}$  (V72) und  $0,022/\text{h}$  (V133).

Die LF-Reaktionsgeschwindigkeits-Konstante bei der Belüftung von separierter Schweinegülle ist sowohl von der Belüftungsrate als auch von der erzielten Maximaltemperatur abhängig. Dies wird deutlich, wenn die Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten aller Versuche bei den verschiedenen Belüftungsraten in Abhängigkeit der erzielten Maximaltemperatur betrachtet werden. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden die erzielten Maximaltemperaturen in Temperaturbereiche zusammengefasst (Tab. 4.6). Lagen mehrere Messwerte in einem Temperaturbereich vor, wurden diese gemittelt.

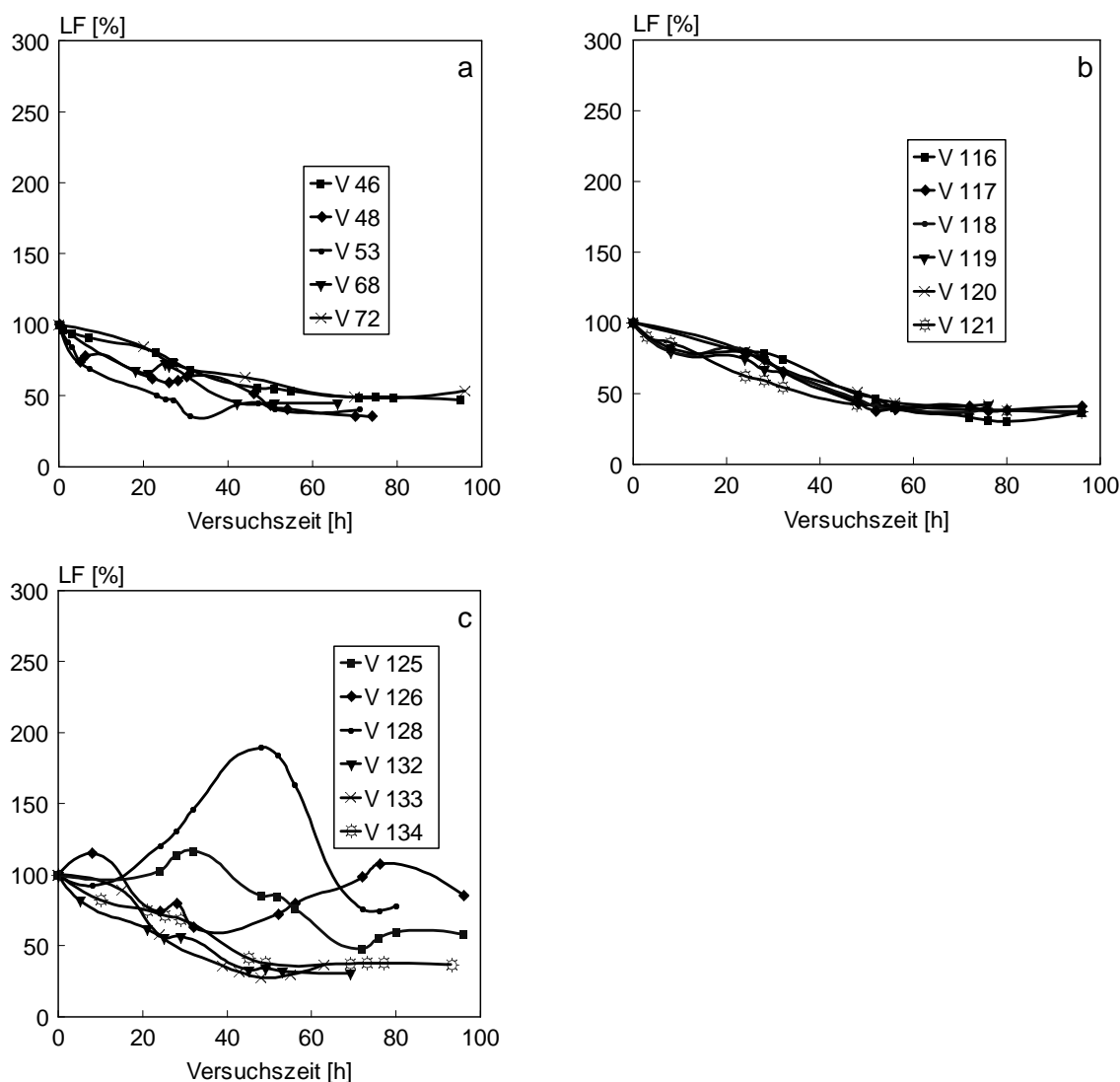


Abb. 4.8 a, b und c: Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit bei der Belüftung von separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$

Tab. 4.5: LF-Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten bei der Belüftung von separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

V-Nr	LF,o [mS/cm]	Zeitintervall [h]	Zahl der Messpunkte	k [1/h]	r <sup>2</sup>	T, max [°C]
46	26,3	0 – 95	14	0,0097	0,93	36,5
48	27,3	0 – 74	12	0,0156	0,88	49,2
53	27,8	0 – 71	12	0,0108	0,47	55,5
68	28,7	0 – 66	8	0,0148	0,85	56,0
72	31,5	0 – 96	6	0,0083	0,83	45,0
116	39,3	0 – 96	12	0,0137	0,89	71,0
117	38,4	0 – 96	11	0,0127	0,75	68,4
118	34,8	0 – 96	12	0,0131	0,87	68,6
119	38,1	0 – 76	10	0,0143	0,90	67,3
120	31,9	0 – 76	6	0,0126	0,94	63,4
121	24,2	0 – 96	12	0,0135	0,80	53,4
125	28,0	n. a.				
126	5,4	n. a.				
128	14,1	n. a.				
132	35,5	0 – 69	9	0,0205	0,93	68,1
133	35,2	0 – 63	8	0,0220	0,82	58,0
134	36,6	0 – 93	11	0,0136	0,84	59,2

n. a. : nicht ausgewertet

Tab. 4.6: Abhängigkeit der LF-Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten von der Belüftungsrate und der Maximaltemperatur bei der Belüftung separierter Schweinegülle, Angaben in [1/h]

T, max [°C]	Belüftungsrate [m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·h)]		
	5	10	20
30 – 39,9	-	-	0,0097
40 – 49,9	0,0031	0,0081	0,0120
50 – 59,9	0,0055	0,0100	0,0152*
60 – 69,9	0,0098	0,0102	0,0146
70 – 79,9	0,0096	0,0142	0,0137

\* ohne V133

Die bei der Belüftung erzielte Leitfähigkeitsänderung zeigte einen eindeutigen Zusammenhang mit der Reduktion der Ammoniumkonzentrationen bei allen getesteten Belüftungsraten (Tab. 4.7 – 4.9, Abb. 4.9). Die Belüftungsrate hatte keinen Einfluss auf diesen Zusammenhang. Mit Hilfe der Funktionsgleichung (Abb. 4.9) kann somit aus der im Versuchsablauf gemessenen Leitfähigkeitsänderung die erzielte Ammoniakelimination berechnet werden.



Bei sehr feststoffreichen Gällen gilt dieser Zusammenhang jedoch nur mit Einschränkungen, wie die Versuche 129, 130, 127 und 128 (Abb. 4.6 b, 4.7 c, 4.8 c) bestätigen. In diesen Fällen stieg die Leitfähigkeit zunächst mit der Versuchsdauer und zunehmenden Temperaturen deutlich an und fiel erst nach etwa 40 h ab. Insofern ist davon auszugehen, dass bei hoch konzentrierten Gällen und geringen Temperaturen die Beweglichkeit von Ionen deutlich eingeschränkt ist.

Tab. 4.7: Reduktion der elektrischen Leitfähigkeit und Abnahme der Ammoniumkonzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

V-Nr	Zeitintervall [h]	LF <sub>A</sub> [mS/cm]	LF <sub>E</sub> [mS/cm]	d LF [mS/cm]	NH <sub>4</sub> N <sub>A</sub> [g/kg]	NH <sub>4</sub> N <sub>E</sub> [g/kg]	d NH <sub>4</sub> N [g/kg]
50	0 – 96	23,8	14,3	9,5	4,17	2,85	1,32
81	0 – 74	33,8	18,3	15,5	5,31	3,01	2,30
122	0 – 96	17,0	13,2	3,8	2,14	1,84	0,30
123	0 – 96	26,0	21,2	4,8	3,88	3,29	0,59
149	0 – 96	30,6	13,5	17,1	5,31	2,26	3,05

n. a. : nicht ausgewertet, Index A: Anfang, Index E: Ende, d: Differenz

Tab. 4.8: Reduktion der elektrischen Leitfähigkeit und Abnahme der Ammoniumkonzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

V-Nr	Zeitintervall [h]	LF <sub>A</sub> [mS/cm]	LF <sub>E</sub> [mS/cm]	d LF [mS/cm]	NH <sub>4</sub> N <sub>A</sub> [g/kg]	NH <sub>4</sub> N <sub>E</sub> [g/kg]	d NH <sub>4</sub> N [g/kg]
49	0 – 80	27,4	13,4	14,0	4,23	2,34	1,89
58	0 – 136	30,7	12,1	18,6	4,99	2,14	2,85
83	0 – 91	33,0	13,7	19,3	5,27	1,11	4,16
103	0 – 96	40,2	20,2	20,0	7,14	2,25	4,89
104	0 – 96	42,2	17,8	24,4	7,64	1,88	5,76
105	0 – 116	25,6	13,1	12,5	3,91	1,39	2,52
106	0 – 96	14,6	7,2	7,4	1,86	0,90	0,96
145	0 – 96	32,2	11,2	21,0	4,67	0,50	4,17
151	0 – 96	32,5	11,7	16,2	5,15	0,90	4,25
152	0 – 72	28,3	12,1	20,8	5,16	1,11	4,05

Index A: Anfang, Index E: Ende, d: Differenz

Tab. 4,9: Reduktion der elektrischen Leitfähigkeit und Abnahme der Ammoniumkonzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

V-Nr	Zeitintervall [h]	LF <sub>A</sub> [mS/cm]	LF <sub>E</sub> [mS/cm]	d LF [mS/cm]	NH <sub>4</sub> N <sub>A</sub> [g/kg]	NH <sub>4</sub> N <sub>E</sub> [g/kg]	d NH <sub>4</sub> N [g/kg]
48	0 – 100	27,3	9,2	18,2	4,17	1,03	3,14
53	0 – 71	27,8	11,2	16,6	4,54	1,23	3,31
68	0 – 67	28,7	12,9	15,8	5,21	2,43	2,78
72	0 – 96	31,5	15,3	16,2	4,20	1,67	2,53
116	0 – 96	39,3	14,5	24,8	5,77	0,98	4,79
117	0 – 96	38,4	15,8	22,6	6,39	1,12	5,27
118	0 – 96	34,8	12,4	22,4	6,20	1,33	4,87
119	0 – 96	38,1	15,9	22,2	6,43	1,07	5,36
121	0 – 96	24,2	9,1	15,1	3,34	0,83	2,51
132	0 – 69	35,5	10,9	24,6	6,15	0,96	5,19
134	0 – 93	36,6	13,5	23,1	6,40	1,95	4,45

Index A: Anfang, Index E: Ende, d: Differenz

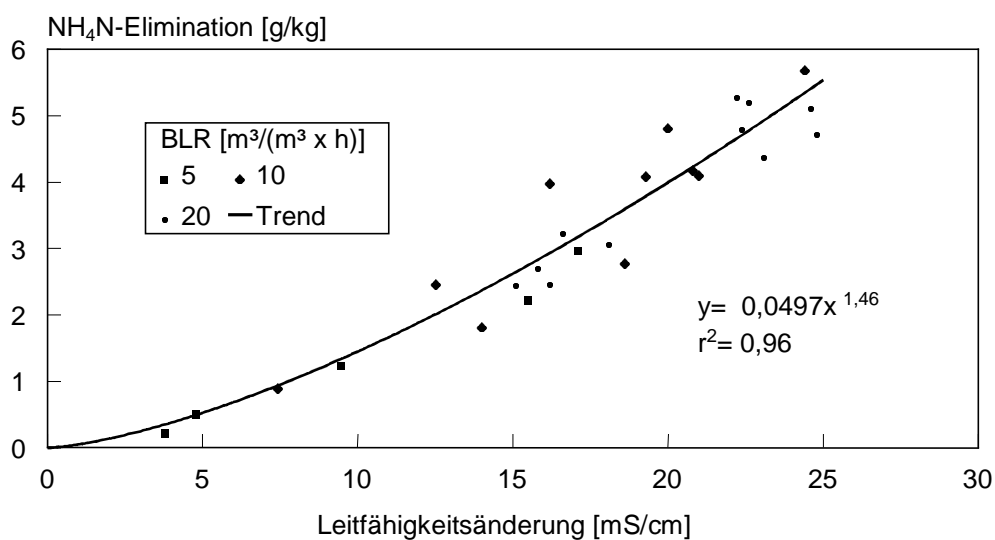


Abb. 4.9: Zusammenhang zwischen Leitfähigkeitsänderung und Ammonium-Elimination bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit Belüftungsraten von 5 bis 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

#### 4.1.2 Sauerstoff, Kohlendioxid und Redoxpotenzial

Die sich bei der Belüftung von separierter Schweinegülle einstellende Gelöstsauerstoffkonzentration hängt bei einem vorgegebenen Belüftungssystem (s. Kapitel 3) im wesentlichen von der Belüftungsrate, dem physiologischen Zustand und der Konzentration der Mikroorganismen sowie der Konzentration an leicht abbaubaren Kohlenstoffquellen ( $BSB_5$ ) ab. Der zeitliche Verlauf der Gelöstsauerstoffkonzentration wird nachfolgend für die drei untersuchten Belüftungsraten anhand von jeweils drei Versuchen mit stark unterschiedlichen  $BSB_5$ -Konzentrationen dargestellt (Abb. 4.10).

Bei Belüftungsraten von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  trat nach Einschalten der Belüftung eine schnelle Erhöhung der Gelöstsauerstoffkonzentration, die in der Reaktorumlaufleitung gemessen wurde (Abb. 3.1, S. 23), auf. Bei geringen  $BSB_5$ -Konzentrationen stieg sie bis in den Sättigungsbereich (V50), während bei höheren  $BSB_5$ -Konzentrationen auch im Anfangsbereich nur geringe (V81) oder auch nicht mehr nachweisbare Gelöstsauerstoffkonzentrationen (V130) gemessen wurden. Mit Einsetzen des mikrobiellen Stoffabbaus sank die Gelöstsauerstoffkonzentration bei allen Versuchen unter die Nachweisgrenze. Bei geringen  $BSB_5$ -Konzentrationen (V50) wurde nach 40 – 50 h Belüftungszeit ein Wiederanstieg der Gelöstsauerstoffkonzentration gemessen, wohingegen bei höheren  $BSB_5$ -Konzentrationen auch nach 74 h (V81) bzw. 100 h (V130) kein Anstieg der Gelöstsauerstoffkonzentration nachweisbar war (Abb. 4.10). Ausgehend von den Messergebnissen ist festzustellen, dass bei Belüftungsraten von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  die Sauerstoffversorgung über etwa 32 h (V50) bzw. mehr als 62 h (V81) und 96 h (V130) für den Stoffabbau eine limitierende Größe darstellte.

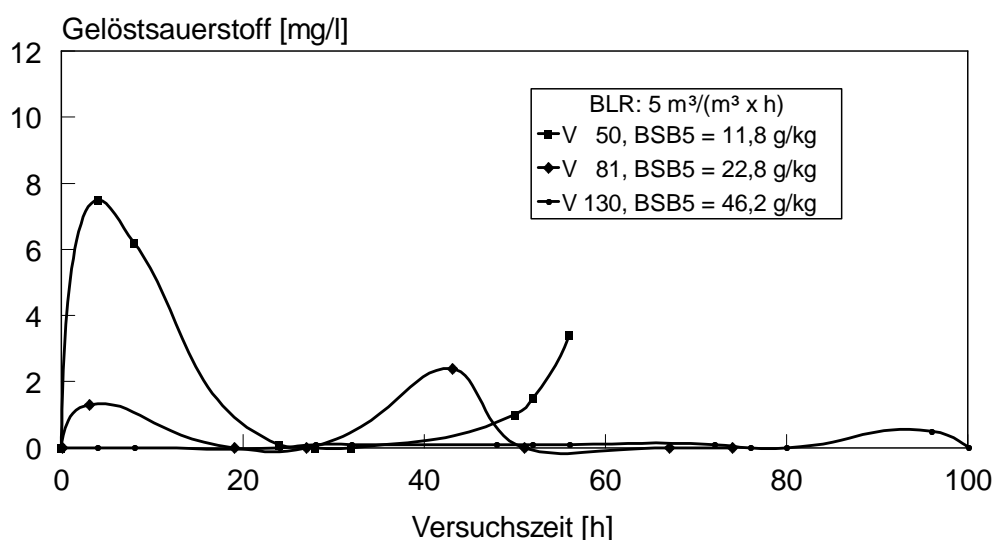


Abb. 4.10: Gelöstsauerstoffkonzentrationen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  bei verschiedenen  $BSB_5$ -Konzentrationen

Bei Belüftungsraten von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  wurden prinzipiell vergleichbare Verläufe der Gelöstsauerstoffkonzentrationen gemessen (Abb. 4.11). Der zu Versuchsbeginn auftretende Anstieg der Gelöstsauerstoffkonzentration erreichte bei allen  $BSB_5$ -Konzentrationen jedoch höhere Werte. Sauerstofflimitierungen wurden bei geringen  $BSB_5$ -Konzentrationen (V58)

nicht festgestellt. Bei Versuchen mit höheren BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen traten Sauerstofflimitierungen über etwa 30 h (V83) bzw. 40 – 50 h (V127) auf.

Belüftungsraten von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) erbrachten tendenziell eine weitere Verkürzung der Sauerstofflimitierung auf 10 - 30 h, insbesondere bei höheren BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen. Der Wiederanstieg der Gelöstsauerstoffkonzentration nach 30 – 50 h war bei dieser Belüftungsrate am deutlichsten erkennbar (Abb. 4.12).

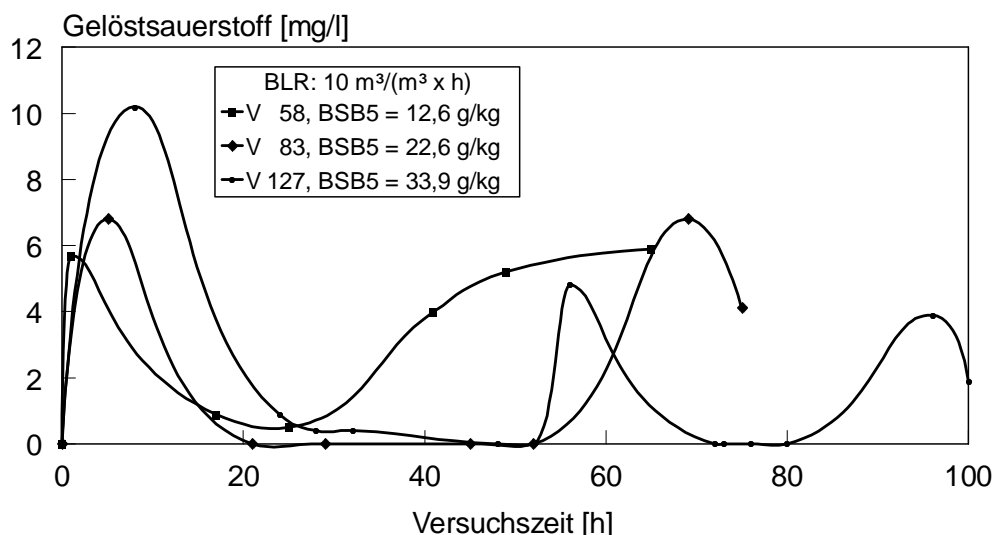


Abb. 4.11: Gelöstsauerstoffkonzentrationen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) bei verschiedenen BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen

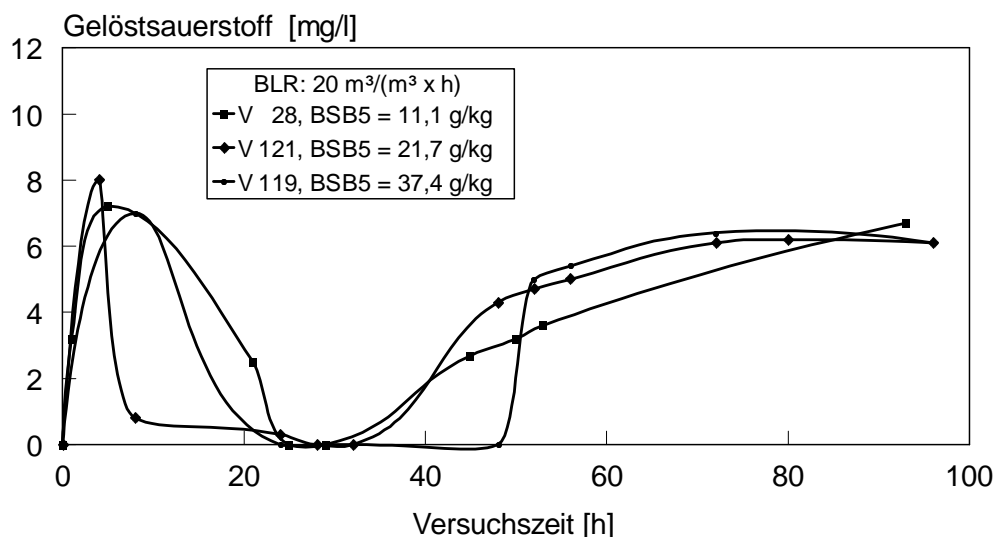


Abb. 4.12: Gelöstsauerstoffkonzentrationen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) bei verschiedenen BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen

Die bei den Versuchen 81, 104 und 119 im Abgas des Bioreaktors gemessenen Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentrationen sind in den Abb. 4.13 – 4.15 dargestellt. Im Gegensatz zu den Versuchen 104 und 119 liegen für den Versuch 81 nur diskontinuierlich gemessene Werte vor. Unmittelbar nach Einsetzen der Belüftung wurden bei allen Belüftungsraten hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Abgas gemessen.

Die  $\text{CO}_2$ -Emissionen stiegen in diesem Zeitraum mit der Belüftungsrate an. Dieser Effekt ist auch verantwortlich für die unterschiedlichen pH-Wertverläufe, insbesondere in den ersten Versuchsstunden (s. Kap. 4.1.1 und Abb. 4.4). Nach dieser kurzzeitigen  $\text{CO}_2$ -Strippung fielen die  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen im Abgas auf ein Minimum und stiegen erst wieder mit dem Einsetzen des mikrobiellen Stoffabbaus an. Umfang und Dauer der  $\text{CO}_2$ -Emissionen waren von der Belüftungsrate, der  $\text{BSB}_5$ -Konzentration und den sich bei der Belüftung einstellenden pH-Werten abhängig.

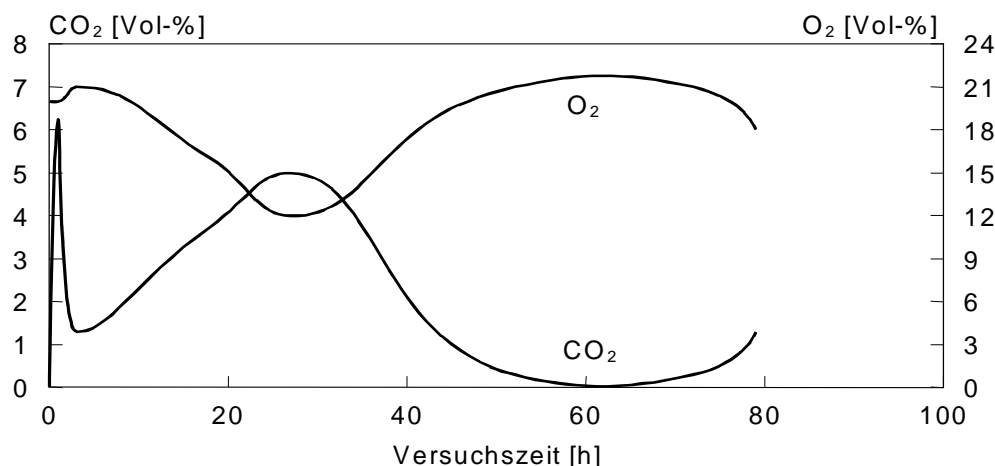


Abb. 4.13: Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentrationen im Abgas des Bioreaktors bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , Versuch 81

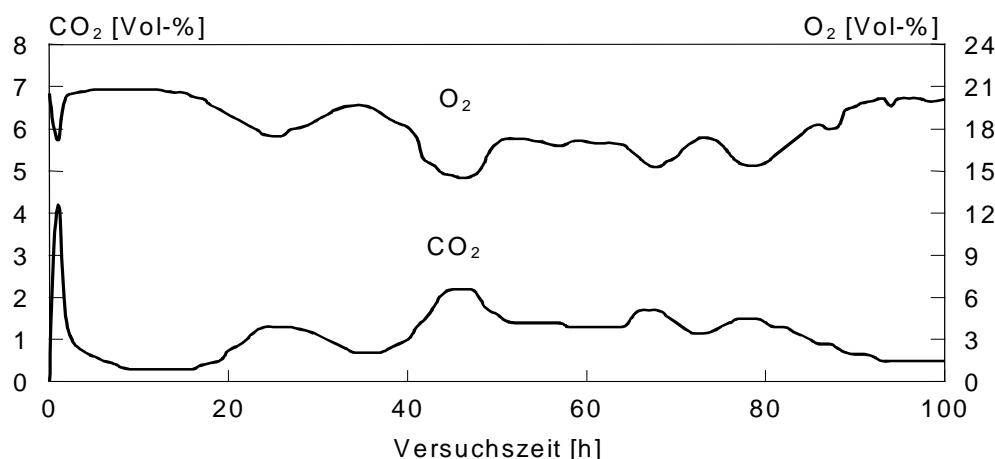


Abb. 4.14: Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentrationen im Abgas des Bioreaktors bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , Versuch 104

Die im Abgas gemessenen Sauerstoffkonzentrationen sanken mit Einsetzen des mikrobiellen Stoffabbaus kontinuierlich ab. Im Versuch 81 mit einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  lagen sie im Minimum bei 12 Vol -%, im Versuch 104 ( $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ) bei 14,5 und im Versuch 119 ( $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ) bei 14,1 Vol-%. Die Sauerstoffausnutzung, d. h. der Quotient aus dem biochemischen Sauerstoffverbrauch ( $\text{BSB}_5$ ) und der im Versuchszeitraum (96 h) durchgesetzten Sauerstoffmenge war bei der Belüftung von separierter Schweinegülle

gering. Selbst unter der Voraussetzung eines 100 % igen BSB<sub>5</sub>-Abbaus lag die rechnerisch ermittelte Sauerstoffausnutzung bei den höchsten BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen und der geringsten, getesteten Belüftungsrate von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) bei maximal 37,2 % (Abb. 4.16). Eine höhere Sauerstoffausnutzung wäre theoretisch vor allem durch die Verringerung der Belüftungsrate oder (in geringerem Umfang) durch höhere BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen zu erreichen. Da jedoch die Gelöstsauerstoffkonzentration bei Belüftungsraten von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) und hohen BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen über den gesamten Versuchszeitraum den Kohlenstoffabbau limitierte (s. Abb. 4.10), ist eine Sauerstoffausnutzung über 40 % eher unwahrscheinlich. Ferner treten mit wachsenden BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen auch höhere Konzentrationen an anderen Inhaltsstoffen (Feststoffe) auf, die zu Diffusionshemmungen führen dürften. Es ist darüber hinaus zu bedenken, dass unter den Bedingungen einer hohen Sauerstoffausnutzung (geringe Belüftungsraten, hohe BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen) und der in Abhängigkeit der Belüftungsrate resultierenden pH-Werte (Kap. 4.1.1) praktisch keine Ammoniakstrippung mehr möglich wäre.

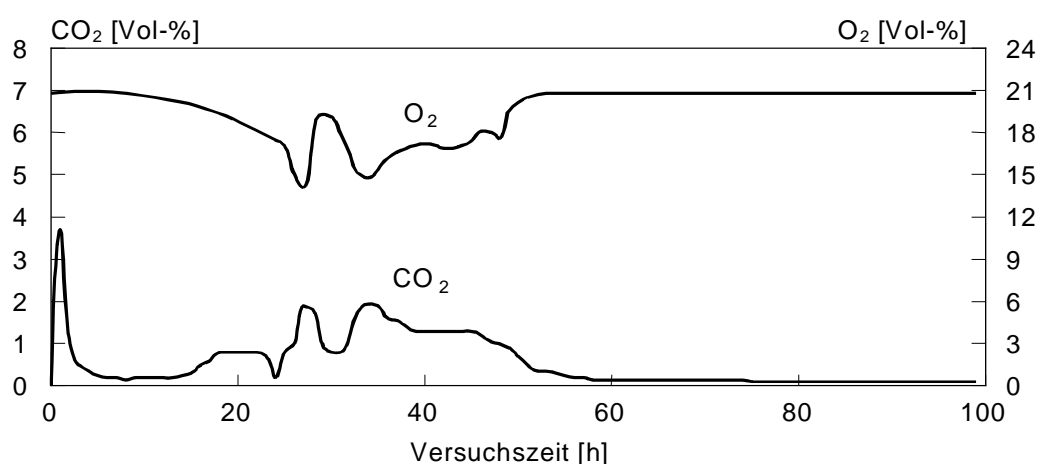


Abb. 4.15: Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentrationen im Abgas des Bioreaktors bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h), Versuch 119

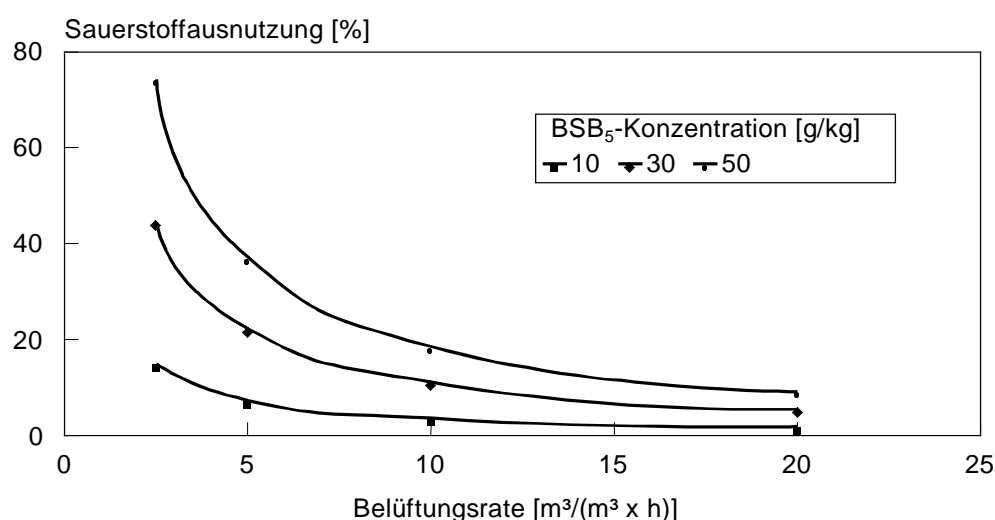


Abb. 4.16: Abhängigkeit der Sauerstoffausnutzung von der Belüftungsrate bei der Belüftung von separierter Schweinegülle mit unterschiedlichen BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen

Das sich bei der Belüftung einstellende Redoxpotenzial war in starkem Maße von der Belüftungsrate und in geringerem Umfang von der Atmungsgeschwindigkeit der Mikroorganismen abhängig. Nach der Reaktorbefüllung und unmittelbar vor Einschalten der Belüftung lag das Redoxpotenzial zwischen  $-239$  und  $-171$  mV. Mit dem Einsetzen der Belüftung stieg es bei allen Belüftungsraten innerhalb von  $1 - 3$  h auf Werte von  $177 - 315$  mV an. Durch die einsetzende mikrobielle Atmung nahm das Redoxpotenzial anschließend wieder ab, wobei dieser Rückgang bei Belüftungsraten von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  besonders stark ausgeprägt war und um so höher ausfiel, je höher die  $\text{BSB}_5$ -Konzentrationen waren. Bei Versuch 50 ( $\text{BSB}_5$ -Konzentration:  $11,8 \text{ g/kg}$ ) fiel es bis auf  $-63$  mV, bei Versuch 81 ( $\text{BSB}_5$ -Konzentration:  $22,8 \text{ g/kg}$ ) bis auf  $-162$  mV. Nach Abschluss des  $\text{BSB}_5$ -Abbaus (V 50, nach  $48$  h) trat ein schneller Wiederanstieg des Redoxpotenzials auf, wobei die Werte zwischen  $229$  und  $258$  mV lagen. Bei V 81 wurde bis zum Versuchsabbruch nach  $74$  h kein messbarer Anstieg der Gelöstsauerstoffkonzentration festgestellt. Dementsprechend niedrig lagen mit Werten von  $-13$  bis  $+70$  mV auch die Redoxpotenziale, die unter diesen Bedingungen auch erheblich schwankten. Bei Belüftungsraten von  $10$  und  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  war der Rückgang des Redoxpotenzials – bedingt durch die mikrobielle Aktivität – nur schwach ausgeprägt. Bei Versuchen mit Belüftungsraten von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  und geringen  $\text{BSB}_5$ -Konzentrationen (V 58,  $\text{BSB}_5$ :  $12,6 \text{ g/kg}$ ) sowie generell bei Belüftungsraten von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  fiel das Redoxpotenzial über die gesamte Versuchsdauer nicht ab. Die Werte bewegten sich zwischen  $177$  und  $367$  mV. Lediglich bei sehr hohen  $\text{BSB}_5$ -Konzentrationen und Belüftungsraten von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  wurde ein kurzfristiger Rückgang auf Werte von  $53 - 82$  mV gemessen. Negative Redoxpotenziale traten unter diesen Bedingungen in keinem Fall auf.

### 4.1.3 Selbsterhitzung

Durch oxidativen Abbau von leicht verfügbaren Kohlenstoffquellen und einer entsprechenden Isolation des Bioreaktors setzte in Abhängigkeit der gewählten Belüftungsrate eine Selbsterhitzung ein. In der Mehrzahl der 43 durchgeführten Versuche trat mit Einsetzen der Belüftung eine sofortige Temperaturerhöhung auf. Bei einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  (Abb. 4.17 a und b) lag der Temperaturanstieg zwischen  $0,12 \text{ }^\circ\text{C/h}$  (V122) und  $1,32 \text{ }^\circ\text{C/h}$  (V130). Die innerhalb von 100 h Versuchszeit erzielten, maximalen Gülletemperaturen schwankten zwischen  $48,3 \text{ }^\circ\text{C}$  (V123) und  $71,3 \text{ }^\circ\text{C}$  (V149). Für die entseuchende Wirkung ist neben der Ammoniakkonzentration, dem pH-Wert und der Maximaltemperatur auch die Temperaturhaltezeit ( $T \geq 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) von großer Bedeutung. Sofern eine Temperatur  $\geq 50 \text{ }^\circ\text{C}$  überhaupt erzielt wurde, lag die  $T_{50}$ -Haltezeit zwischen 56 h (V50) und 110 h (V130) (Tab. 4.10).

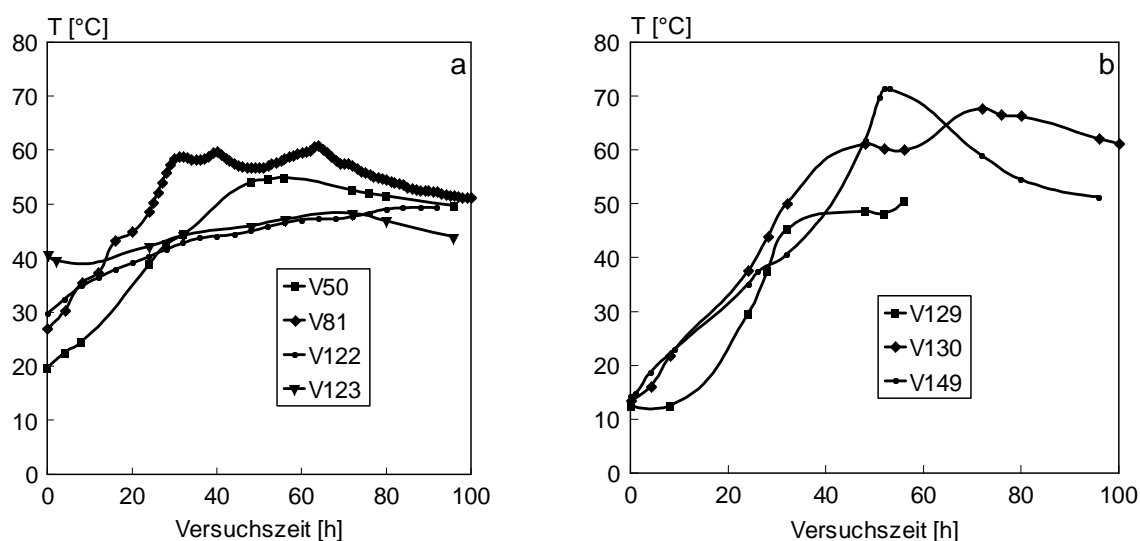


Abb. 4.17 a und b: Temperaturverlauf bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$

Tab. 4.10: Temperaturanstieg, Maximaltemperatur und  $T_{50}$ -Haltezeit bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$

V-Nr	BSB <sub>5,0</sub> [g/kg]	Zeitintervall [h]	Temperatur- Anstieg [ $^\circ\text{C/h}$ ]	T <sub>max</sub> [ $^\circ\text{C}$ ]	T <sub>50</sub> -Haltezeit [h]
50	11,8	0 – 48	0,75	54,9	56
81	22,8	0 – 31	1,03	60,8	83
122	12,7	0 – 92	0,19	49,4	n. e.
123	21,7	0 – 72	0,12	48,3	n. e.
129	39,2	8 – 32	1,32	50,5*	n. b.
130	46,2	0 – 48	1,05	67,7	110
149	20,1	0 – 53	1,07	71,3	64

\*: Versuchsabbruch, n. e.: nicht erreicht, n. b.: nicht bestimmt

Mit Belüftungsraten von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  wurden insgesamt 15 Versuche durchgeführt (Abb. 4.18 a, b und c). Der Temperaturanstieg, der im Regelfall sofort einsetzte, schwankte zwischen  $0,38 \text{ }^\circ\text{C/h}$  (V52) und  $1,59 \text{ }^\circ\text{C/h}$  (V67) (Tab. 4.11.). Die Maximaltemperaturen lagen



zwischen 36,9 (V52) und 72,8 °C (V145). Temperaturen  $\geq 50$  °C wurden, soweit sie überhaupt erreicht wurden, über 12 (V58) bis 76 h (V83) aufrechterhalten.

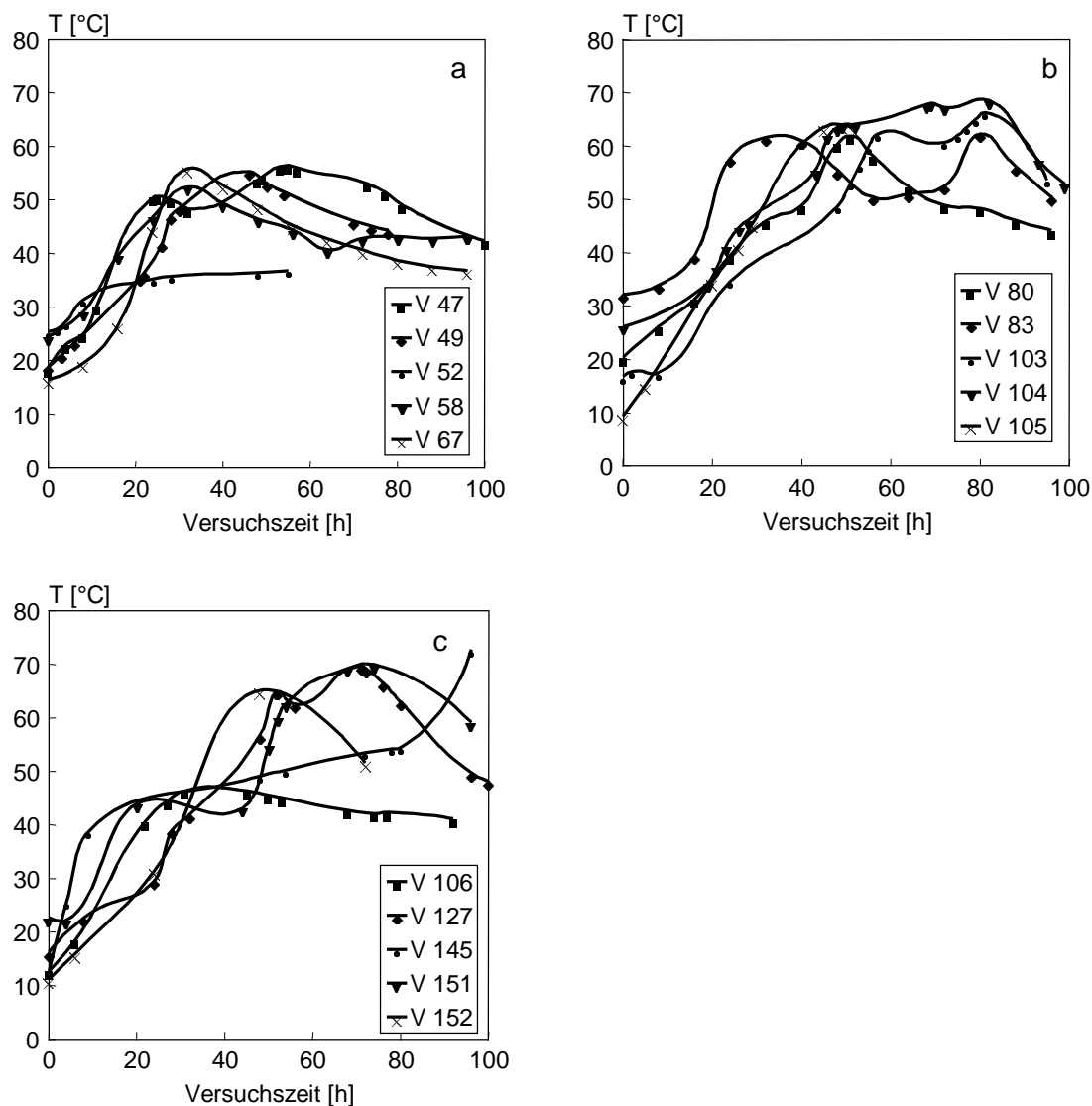


Abb. 4.18 a, b und c: Temperaturverlauf bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

Mit Belüftungsraten von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  wurden 21 Versuche durchgeführt (Abb. 4.19 a, b, c und d). Der Temperaturanstieg bewegte sich zwischen  $0,36$  (V72) und  $1,62$  °C/h (V134) (Tab. 4.12). Die maximal erreichten Gülletemperaturen schwankten zwischen  $27,5$  (V29) und  $71$  °C (V116). Soweit Temperaturen  $\geq 50$  °C erzielt wurden, lagen die  $T_{50}$ -Haltezeiten zwischen 11 (V68, V133, V134) und 41 h (V118).

Tab. 4.11: Temperaturanstieg, Maximaltemperatur und  $T_{50}$ -Haltezeit bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$

V-Nr	BSB <sub>5,0</sub> [g/kg]	Zeitintervall [h]	Temperatur- Anstieg [°C/h]	T, max [°C]	T <sub>50</sub> -Haltezeit [h]
47	15,6	0 – 25	1,35	56,5	39
49	13,5	0 – 30	0,96	55,3	26
52	9,6	0 – 28	0,38	36,9	n. e.
58	12,6	0 – 32	0,92	52,5	12
67	18,7	8 – 32	1,59	55,9	20
80	19,6	0 – 51	0,81	62,0	27
83	22,6	8 – 34	1,27	62,4	76
103	n. b.	0 – 57	0,78	66,4	48
104	n. b.	19 – 49	0,92	68,6	67
105	n. b.	0 – 49	1,15	64,1	n. b.
106	n. b.	0 – 31	1,16	46,5	n. e.
127	33,9	0 – 52	0,91	69,7	55
145	19,8	4 – 96	0,38	72,8	n. b.
151	21,0	0 – 74	0,66	70,0	60
152	18,6	0 – 48	1,12	65,2	41

n. e.: nicht erreicht, n. b.: nicht bestimmt

Während der Temperaturanstieg keinen strengen Zusammenhang mit der BSB<sub>5</sub>-Konzentration aufwies, waren Maximaltemperatur (Abb. 4.20) und  $T_{50}$ -Haltezeit (Abb. 4.21) von der BSB<sub>5</sub>-Konzentration abhängig und stiegen mit dieser an. Zur Erzielung einer Maximaltemperatur von  $50 \text{ °C}$  ist bei einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  eine BSB<sub>5</sub>-Konzentration von ca.  $7,3 \text{ g/kg}$  erforderlich. Bei der Erstellung der Funktionsgleichung wurden die Ergebnisse von V122 und V123 wegen ausgebliebener Selbsterhitzung ebenso nicht berücksichtigt wie die des Versuchs 129 wegen vorzeitigen Versuchsabbruchs.

Eine BSB<sub>5</sub>-Konzentration von ca.  $12,9 \text{ g/kg}$  ist erforderlich, um bei einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  eine Maximaltemperatur von  $50 \text{ °C}$  zu erreichen. Die Funktionsgleichung wurde unter Nichtberücksichtigung der Versuche 145, 151 und 152 erstellt.

Bei einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  ist zur Erreichung einer angestrebten Maximaltemperatur von  $50 \text{ °C}$  eine BSB<sub>5</sub>-Konzentration von etwa  $19,3 \text{ g/kg}$  erforderlich. Bei der Erstellung der Funktionsgleichung wurden die Versuche 46, 53, 72, 124 und 126 nicht berücksichtigt.

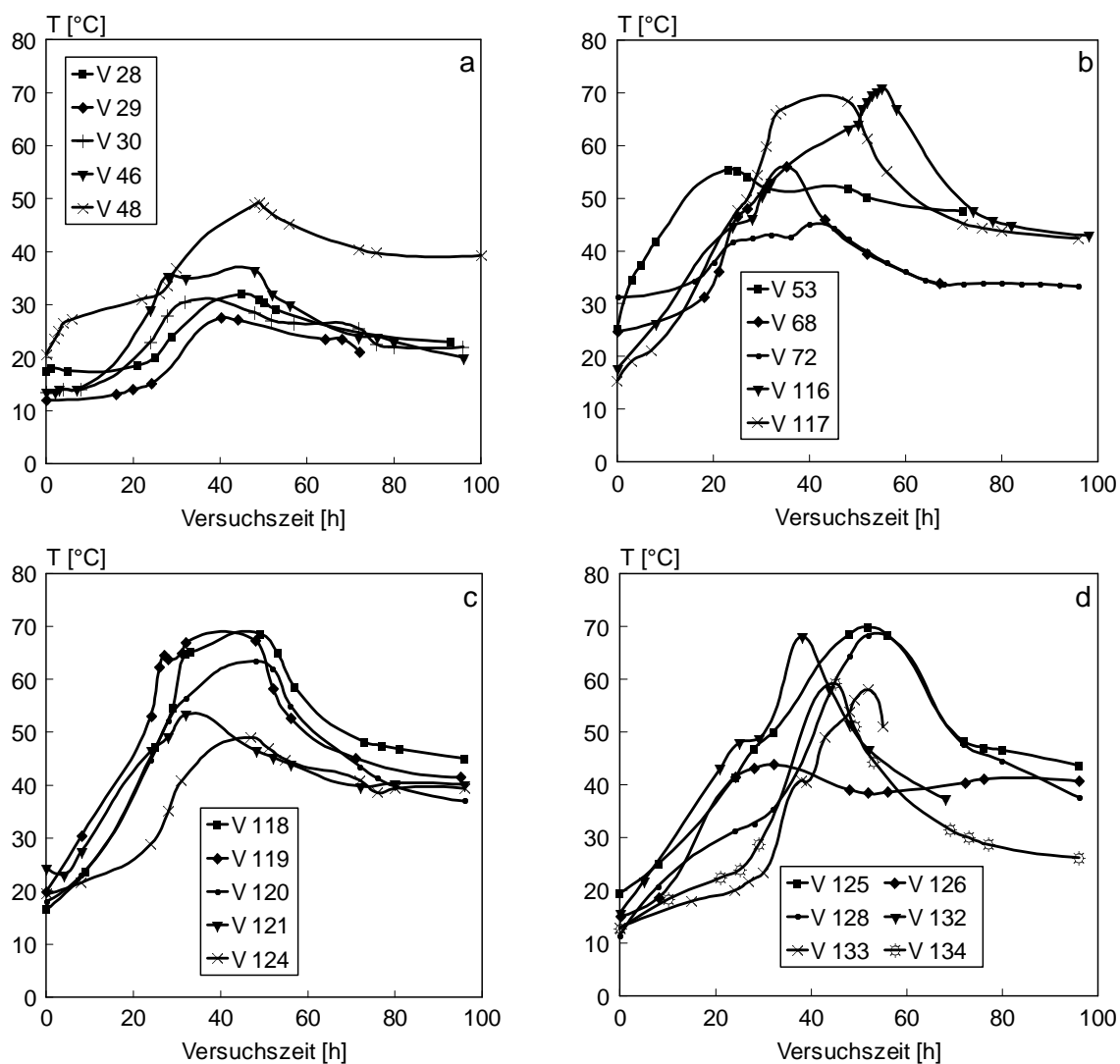


Abb. 4.19 a, b, c, d: Temperaturverlauf bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

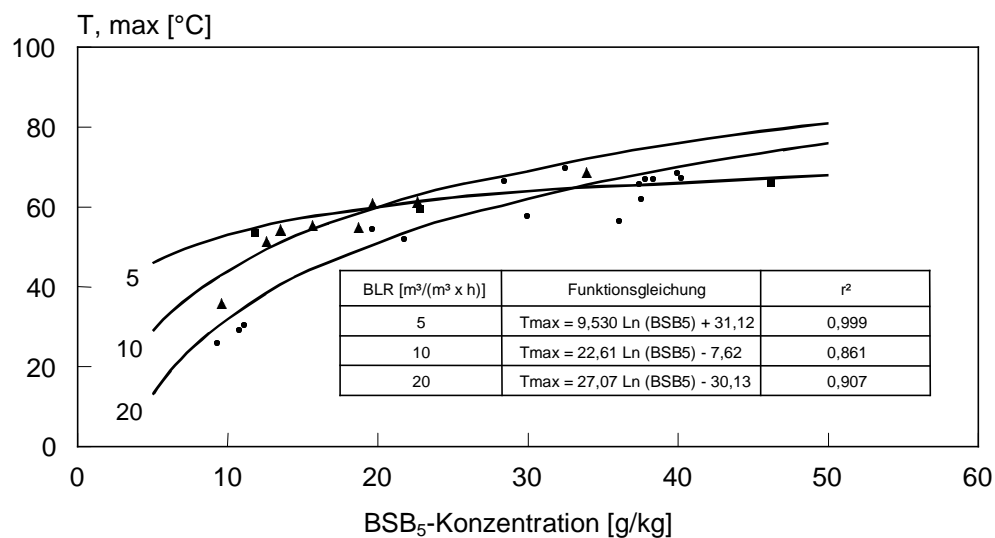


Abb. 4.20: Abhängigkeit der erzielbaren Maximaltemperatur von der BSB<sub>5</sub>-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit verschiedenen Belüftungsrate

Tab. 4.12: Temperaturanstieg, Maximaltemperatur und  $T_{50}$ -Haltezeit bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

V-Nr	BSB <sub>5,0</sub> [g/kg]	Zeitintervall [h]	Temperatur- Anstieg [°C/h]	T, max [°C]	T <sub>50</sub> -Haltezeit [h]
28	11,1	21 – 45	0,57	32	n. e.
29	9,3	20 – 40	0,63	27,5	n. e.
30	10,7	8 – 32	0,69	30,5	n. e.
46	19,3	3 – 28	0,87	36,5	n. e.
48	14,8	0 – 49	0,51	49,2	n. e.
53	8,5	0 – 23	1,19	55,5	38
68	19,6	18 – 35	1,48	56,0	11
72	18,7	0 – 40	0,36	45,0	n. e.
116	32,4	0 – 55	0,93	71,0	40
117	38,3	0 – 34	1,49	68,4	34
118	40,2	0 – 33	1,50	68,6	41
119	37,4	0 – 32	1,54	67,3	34
120	37,5	0 – 48	1,05	63,4	35
121	21,7	0 – 32	1,00	53,4	12
124	43,3	0 – 47	0,66	49,0	n. e.
125	39,9	0 – 32	1,03	69,9	36
126	10,4	0 – 52	1,02	43,8	n. e.
128	37,8	0 – 38	1,08	68,4	28
132	28,4	15 – 52	1,31	68,1	19
133	36,1	15 – 52	1,28	58,0	11
134	29,9	0 – 48	1,62	59,2	11

n. e.: nicht erreicht, n. b.: nicht bestimmt

$T_{50}$ -Haltezeiten von 24 h, wie sie oft zur sicheren Hygienisierung organischen Materials gefordert werden, können bei einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  nach den vorliegenden Ergebnissen in Schweinegülle mit BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen  $\geq 6,1 \text{ g/kg}$  erreicht werden. Bei Belüftungsraten von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  sind hierzu BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen von  $14,5 \text{ g/kg}$  und bei Belüftungsraten von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$   $29,4 \text{ g/kg}$  erforderlich (Abb. 4.21).

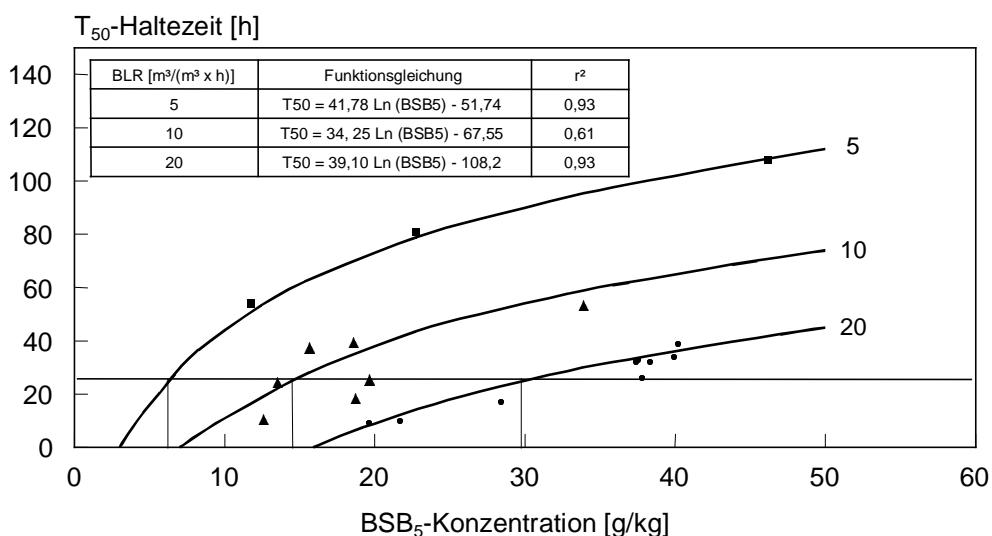


Abb. 4.21: Abhängigkeit der  $T_{50}$ -Haltezeit von der BSB<sub>5</sub>-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit verschiedenen Belüftungsraten

#### 4.1.4 Trockenrückstand

Bei der Bestimmung des Trockenrückstandes wird eine Gülleprobe bei Temperaturen von 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Durch dieses Verfahren wird das in der Probe befindliche Ammonium als Ammoniak verdampft. Da im Zuge der Versuchsdurchführung ein Teil des Ammoniums mikrobiell assimiliert wird und dementsprechend bei der TR-Bestimmung nicht mehr verdampft werden kann, kommt es zu einer Messwertbeeinflussung mit der Folge, dass die TR-Konzentrationen mit der Versuchsdauer ansteigen würden. Zur Vermeidung dieser Fehlinterpretation wurde die Ammoniumstickstoff-Konzentration auf Ammoniak umgerechnet und zu der zeitgleich gemessenen TR-Konzentration addiert. Es wurde dabei vorausgesetzt, dass Ammonium bei der TR-Analyse vollständig abdampft.

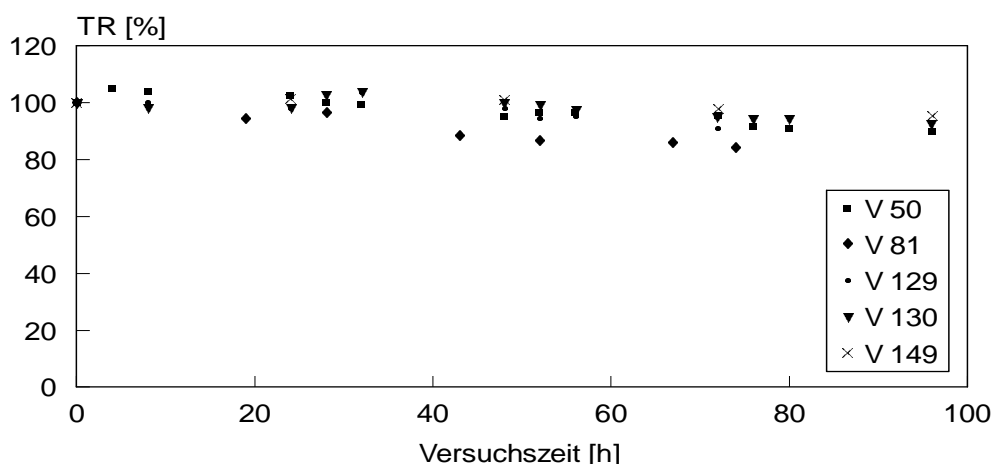


Abb. 4.22: Verlauf der TR-Konzentration in Abhängigkeit von der Versuchszeit bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

Tab. 4.13: Berechneter Verlauf der TR-Konzentrationen in Abhängigkeit von der Versuchszeit (x) bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

V-Nr	Zeitraum [h]	n	Funktionsgleichung	r <sup>2</sup>
50	0 – 96	13	TR = -0,0016 x <sup>2</sup> + 0,0322 x +100	0,79
81	0 – 74	7	TR = 0,0006 x <sup>2</sup> - 0,2605 x +100	0,93
129	0 – 72	9	TR = -0,0029 x <sup>2</sup> + 0,0775 x +100	0,77
130	0 – 96	12	TR = -0,0017 x <sup>2</sup> + 0,0709 x +100	0,73
149	0 – 96	5	TR = -0,0014 x <sup>2</sup> + 0,0794 x +100	0,97
Mittel			TR = -0,0014 x <sup>2</sup> - 0,0001 x +100	

Die TR-Elimination bei einer Belüftungsrate von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) fiel insgesamt gering aus (Abb. 4.22). Werden für die einzelnen Versuche Funktionsanpassungen errechnet und diese gemittelt, wäre mit einer durchschnittlichen TR-Elimination von 9 % nach 80 und 14 % nach 100 h zu rechnen (Tab. 4.13). Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) führten im Vergleich zu den Versuchen mit einer Belüftungsrate von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) zu einer leicht verbesserten TR-Elimination (Abb. 4.23 a, b, c). Auf der Grundlage der gemittelten Funktionsanpassungen wurden mittlere Eliminationsgrade von 16,9 % (nach 80 h) bzw. 21,4 % (nach 100 h) errechnet (Tab. 4.14).

Tab. 4.14: Berechneter Verlauf der TR-Konzentrationen (TR) in Abhängigkeit von der Versuchszeit (x) bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$

V-Nr	Zeitraum [h]	n	Funktionsgleichung	$r^2$
47	0 – 99	13	$\text{TR} = -0,0003 x^2 - 0,1215 x + 100$	0,63
49	0 – 80	12	$\text{TR} = 0,0036 x^2 - 0,5160 x + 100$	0,99
58	0 – 64	6	$\text{TR} = -0,0005 x^2 - 0,2890 x + 100$	0,93
67	0 – 66	6	$\text{TR} = 0,0026 x^2 - 0,3995 x + 100$	0,92
80	0 – 92	9	$\text{TR} = -0,0050 x^2 + 0,2946 x + 100$	0,83
83	0 – 91	7	$\text{TR} = 0,0005 x^2 - 0,3959 x + 100$	0,98
103	0 – 96	5	$\text{TR} = -0,0023 x^2 + 0,0806 x + 100$	0,99
104	0 – 96	10	$\text{TR} = -0,0019 x^2 + 0,0114 x + 100$	0,94
105	0 – 45	6	$\text{TR} = -0,0016 x^2 - 0,2222 x + 100$	1,00
106	0 – 96	12	$\text{TR} = 0,0002 x^2 - 0,2769 x + 100$	0,87
127	0 – 96	11	$\text{TR} = -0,0019 x^2 + 0,0522 x + 100$	0,85
145	0 – 96	5	$\text{TR} = 0,0004 x^2 - 0,0707 x + 100$	0,98
152	0 – 72	4	$\text{TR} = 0,0024 x^2 - 0,5470 x + 100$	1,00
Mittel			$\text{TR} = -0,0003 x^2 - 0,1846 x + 100$	

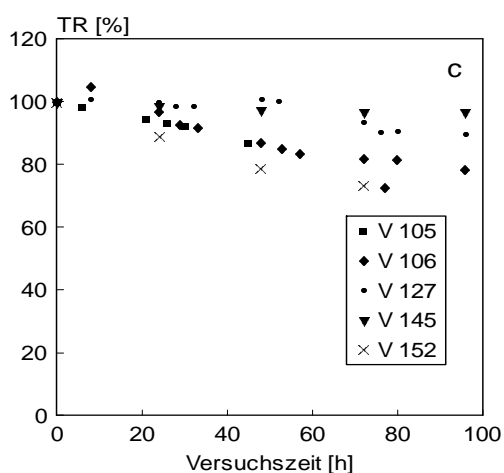
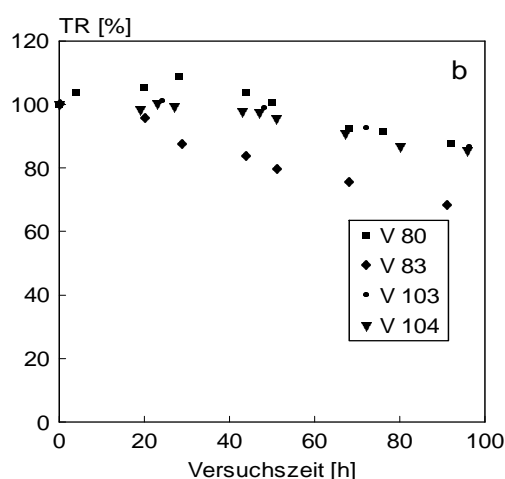
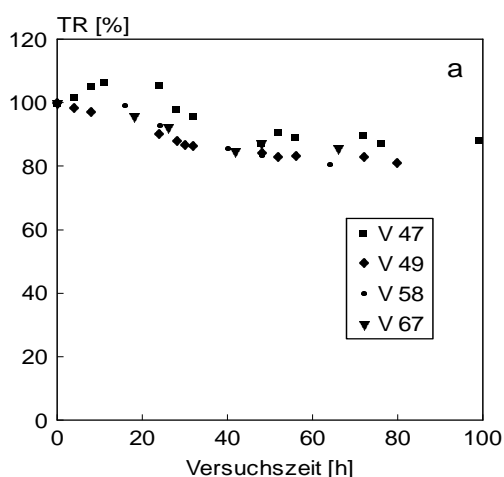


Abb. 4.23 a, b, c: Verlauf der TR-Konzentrationen in Abhängigkeit von der Versuchszeit bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$

Bei Belüftungsraten von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  wurde nur eine geringe Steigerung der TR-Elimination festgestellt (Abb. 4.24 a, b, c, d). Auf der Grundlage der gemittelten Funktionsanpassungen läge die TR-Elimination nach 80 h bei 20,3 % bzw. 27,8 % nach 100 h (Tab. 4.15).

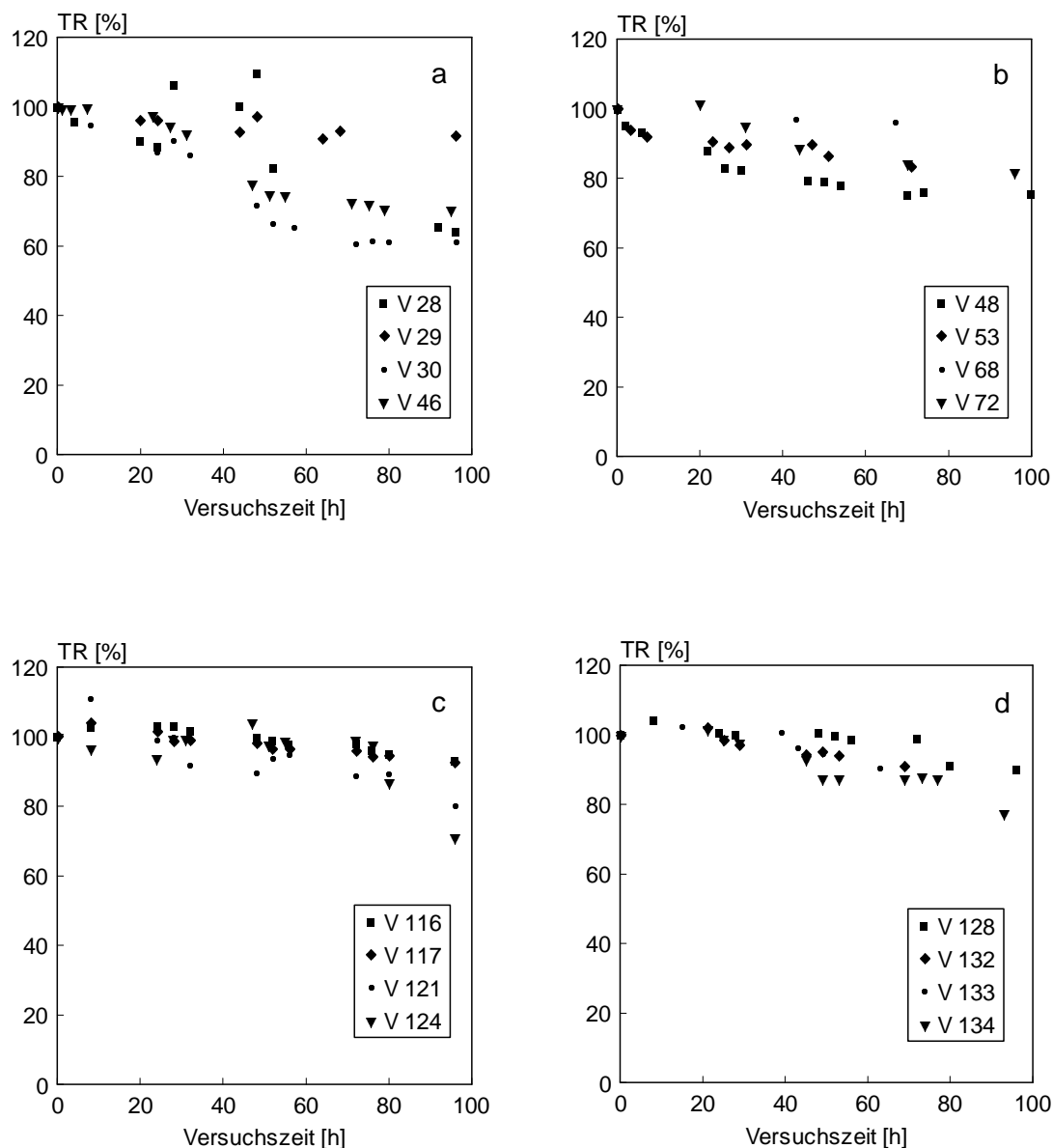


Abb. 4.24 a, b, c, d : Verlauf der TR-Konzentrationen in Abhängigkeit von der Versuchszeit bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

Tab. 4.15: Berechneter Verlauf der TR-Konzentrationen (TR) in Abhängigkeit von der Versuchszeit (x) bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

V-Nr	Zeitraum [h]	n	Funktionsgleichung	r <sup>2</sup>
28	0 – 96	10	TR= - 0,0052 x <sup>2</sup> +0,1234 x +100	0,69
29	0 – 96	10	TR= 0,0008 x <sup>2</sup> - 0,1669 x +100	0,74
30	0 – 96	13	TR= 0,0025 x <sup>2</sup> - 0,6830 x +100	0,94
46	0 – 96	14	TR= 0,0008 x <sup>2</sup> - 0,4301 x +100	0,91
48	0 – 96	12	TR= - 0,0055 x <sup>2</sup> - 0,7214 x +100	-
53	0 – 71	9	TR= 0,0035 x <sup>2</sup> - 0,4612 x +100	0,61
68	0 – 67	3	TR= 0,0026 x <sup>2</sup> - 0,3995 x +100	0,92
72	0 – 96	6	TR= - 0,0002 x <sup>2</sup> - 0,0996 x +100	1,00
116	0 – 96	12	TR= - 0,0019 x <sup>2</sup> +0,1026 x +100	0,84
117	0 – 96	12	TR= - 0,0009 x <sup>2</sup> +0,0007 x +100	0,79
121	0 – 96	11	TR= - 0,0017 x <sup>2</sup> - 0,0366 x +100	0,69
124	0 – 96	12	TR= - 0,0046 x <sup>2</sup> +0,2161 x +100	0,63
128	0 – 96	11	TR= - 0,0023 x <sup>2</sup> +0,1133 x +100	0,82
132	0 – 69	8	TR= - 0,0019 x <sup>2</sup> - 0,0091 x +100	0,86
133	0 – 63	6	TR= - 0,0052 x <sup>2</sup> +0,1666 x +100	0,91
134	0 – 93	11	TR= - 0,0016 x <sup>2</sup> - 0,0808 x +100	0,93
Mittel			TR= - 0,0014 x <sup>2</sup> - 0,1347 x +100	



#### 4.1.5 CSB

Mit separierter Schweinegülle unterschiedlicher Herkunft und Zusammensetzung wurden insgesamt 7 Versuche mit Belüftungsraten von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  über einen Zeitraum von 100 h durchgeführt (Abb. 4.25 a und b). Trotz vergleichbarer Versuchsbedingungen streuten die Ergebnisse erheblich. Die CSB-Abbaugrade schwankten zwischen 6,8 und 32,5 %. Unter Vernachlässigung der Versuche 122 und 123, bei denen offensichtlich nur ein geringer Abbau erzielt wurde, lag der mittlere Abbaugrad bei 27,9 %.

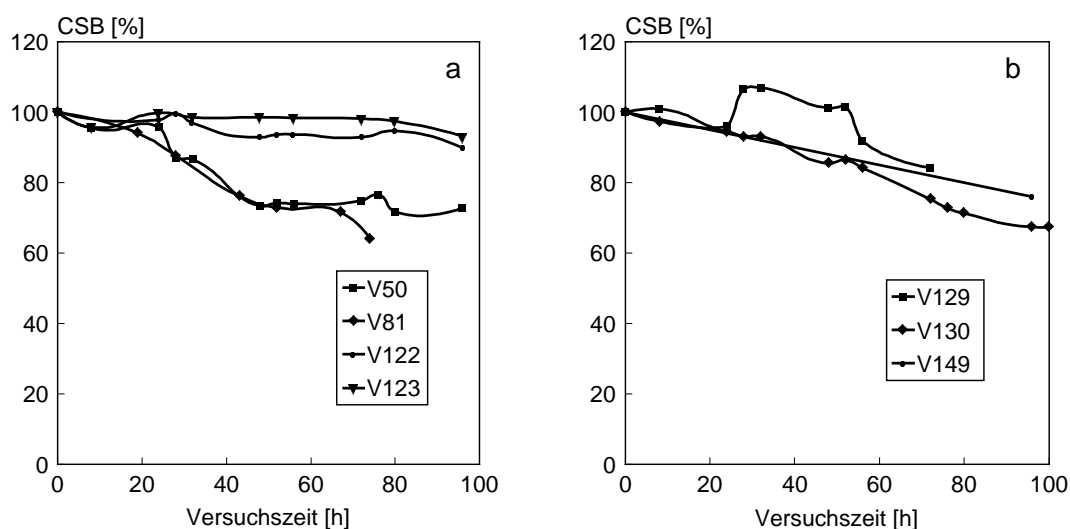


Abb. 4.25 a, b: Verlauf der CSB-Konzentrationen in separierter Schweinegülle in Abhängigkeit von der Belüftungszeit bei einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$

Mit Belüftungsraten von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  wurden 13 Versuche durchgeführt, wobei die Ergebnisse ebenfalls eine breite Streuung aufwiesen (Abb. 4.26). Der nach etwa 100 h erzielte Abbaugrad schwankte zwischen 14,6 % (V 151) und 52,9 % (V 106). Im Mittel aller Versuche betrug er 34,5 % und lag damit um 24 % über dem, der mit Belüftungsraten von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  erzielt wurde.

Insgesamt 21 Versuche wurden mit Belüftungsraten von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  durchgeführt (Abb. 4.27). Die innerhalb von 100 h erzielten Abbaugrade schwankten zwischen 15,2 (V 118) und 63 % (V 48). Unter Vernachlässigung der Versuche 48, 118 und 124 betrug der mittlere Abbaugrad 35,4 %. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Verdopplung der Belüftungsrate von 10 auf  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  zu keiner Verbesserung des erzielten Abbaugrades führte.

Die mit einer exponentiellen Regression ermittelten Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten für Versuche mit einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  sind in Tab. 4.16 dargestellt. Wegen des nahezu fehlenden CSB-Abbaus bei den Versuchen 122 und 123, sowie des untypischen Verlaufs bei Versuch 129 wurden diese für die weitere Betrachtung nicht mehr berücksichtigt. Mit Berücksichtigung dieser Einschränkungen schwankten die Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten zwischen 0,0038/h und 0,0056/h. Im Mittel betrug sie 0,0045/h.

Tab. 4.16: CSB-Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

V-Nr	CSB <sub>0</sub> [g/kg]	Zeitintervall [h]	Zahl der Messpunkte	k [1/h]	r <sup>2</sup>	T <sub>max</sub> [°C]
50	44,4	0 – 96	12	0,0042	0,79	54,9
81	68,7	0 – 74	7	0,0056	0,96	60,8
122	29,6	0 – 96	10	0,001	0,79	49,4
123	56,3	0 – 96	8	0,0004	0,64	48,3
129	87,2	0 – 72	9	0,0008	0,18	50,5
130	92,1	0 – 100	13	0,0038	0,95	67,7
149	66,3	n. b.				

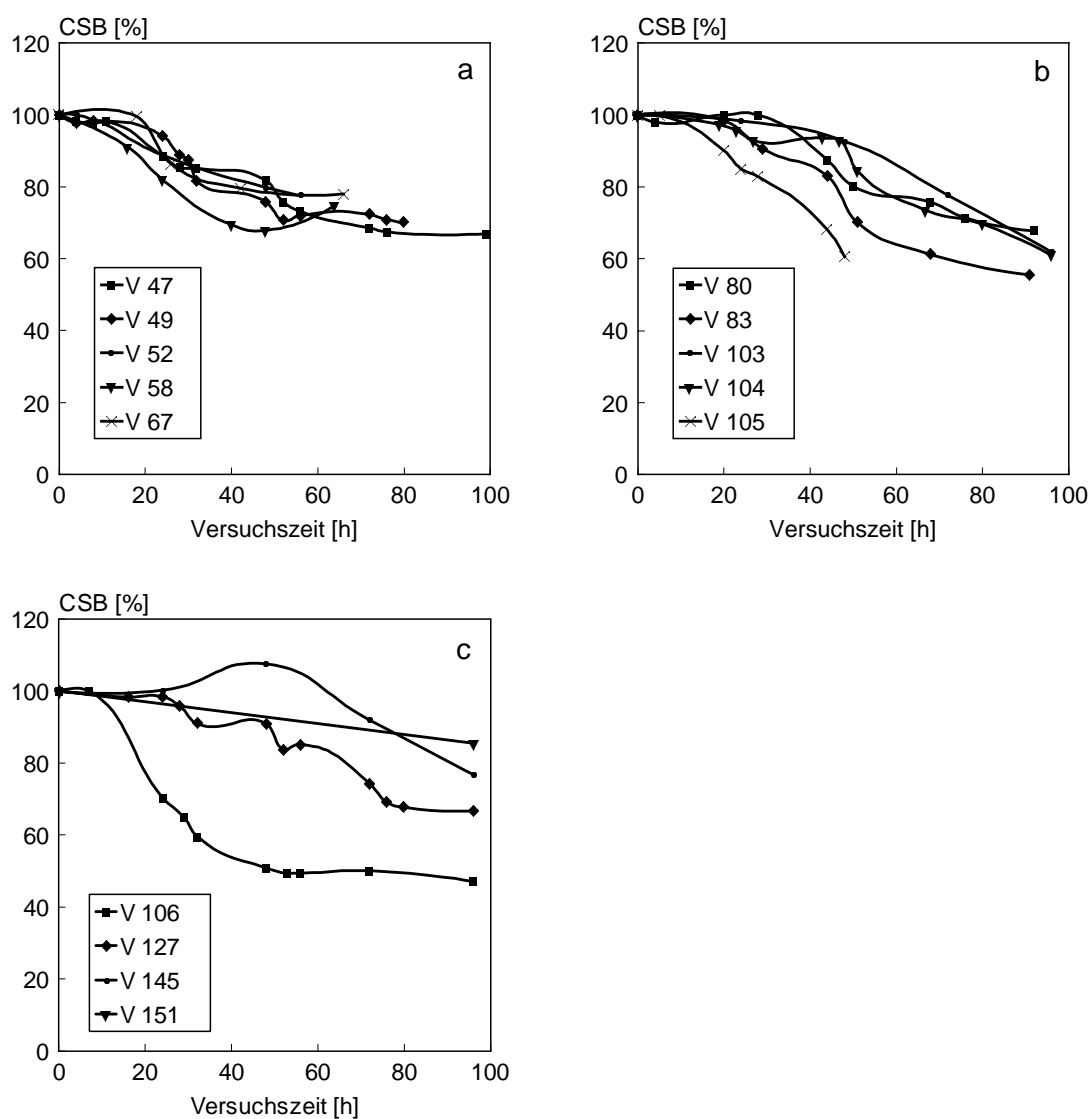


Abb. 4.26 a, b, c: Verlauf der CSB-Konzentrationen bei der Belüftung separierter Schweinegülle in Abhängigkeit von der Belüftungszeit bei einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

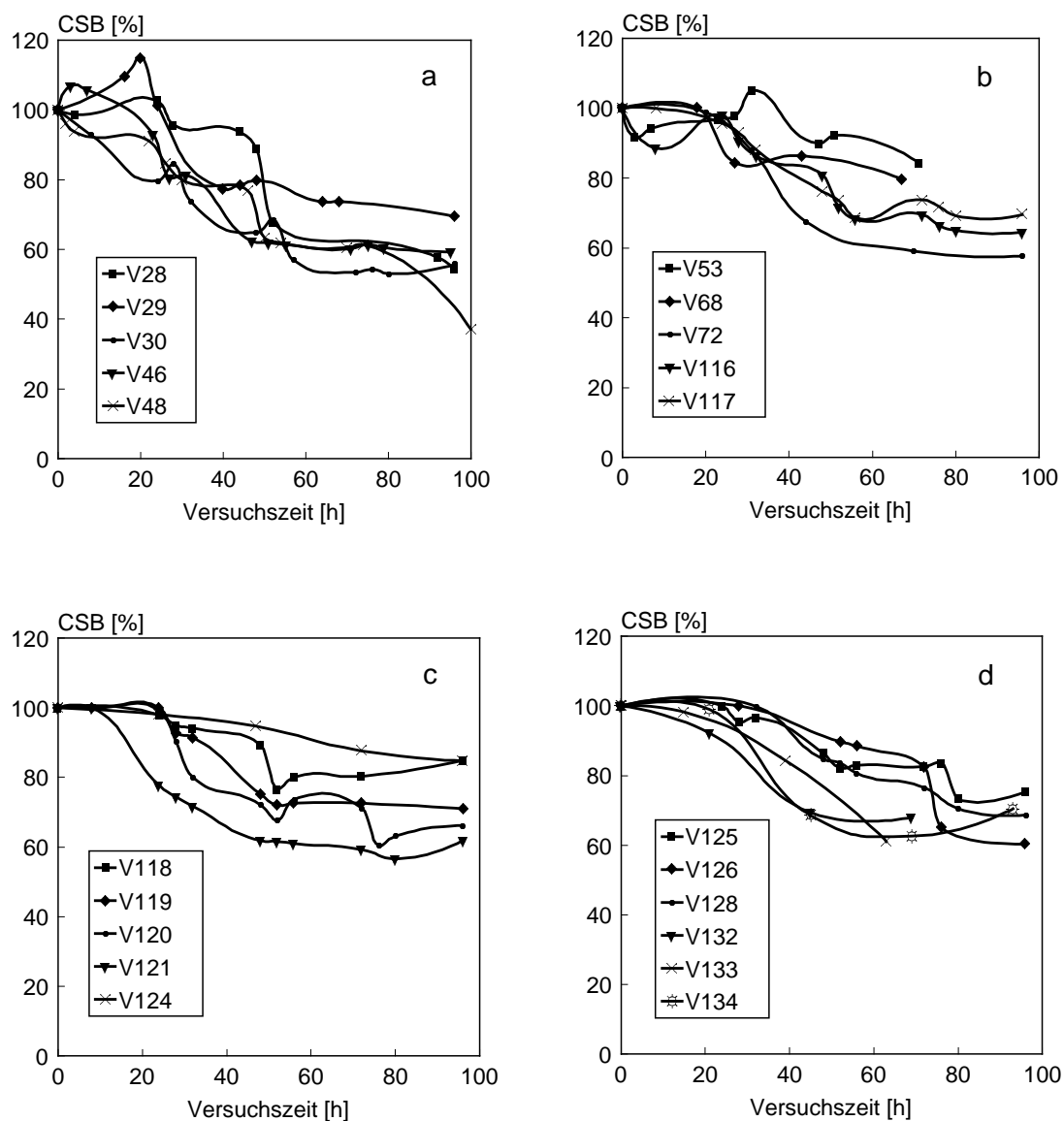


Abb. 4.27 a, b, c, d: Verlauf der CSB-Konzentrationen bei der Belüftung separierter Schweinegülle in Abhängigkeit von der Belüftungszeit bei einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

Die CSB-Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten bei Belüftungsraten von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  sind in Tab. 4.17 dargestellt. Bei Nichtberücksichtigung der Versuche 106, 145 und 151 (Bestimmtheitsmaß des Kurvenverlaufs nicht  $\geq 0,75$  oder nicht bestimmt) schwankte sie zwischen  $0,0039/\text{h}$  und  $0,0083/\text{h}$ . Im Mittel betrug sie  $0,0053/\text{h}$  und lag damit um 18 % über der, die bei einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  ermittelt wurde. Insofern ist bei dieser Belüftungsrate von einer Sauerstofflimitierung auszugehen.

Die CSB-Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten bei Belüftungsraten von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  sind in Tab. 4.18 dargestellt. Für Versuche, bei denen der Kurvenverlauf mit einem Bestimmtheitsmaß  $\geq 0,75$  beschrieben werden kann, schwankte die CSB-Reaktionsgeschwindigkeits-Konstante zwischen  $0,0035/\text{h}$  und  $0,0082/\text{h}$  und betrug im Mittel

0,0055/h. Der Versuch 124 wurde aufgrund sehr hoher Feststoffkonzentration (105,7 g/kg), die zu einer deutlichen Verschlechterung des Abbaus führte, ebenfalls nicht berücksichtigt. Die bei dieser Belüftungsrate ermittelte, mittlere Geschwindigkeits-Konstante war nur unwesentlich höher als die, die bei einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  errechnet wurde.

Tab. 4.17: CSB-Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

V-Nr	CSB <sub>o</sub> [g/kg]	Zeitintervall [h]	Zahl der Messpunkte	k [1/h]	r <sup>2</sup>	Tmax [°C]
47	46,5	0 – 99	12	0,0048	0,95	56,5
49	46,3	0 – 80	13	0,0050	0,91	55,3
52	38,6	0 – 56	5	0,0046	0,99	36,9
58	47,1	0 – 48	5	0,0083	0,98	52,5
67	70,2	0 – 66	5	0,0042	0,83	55,9
80	62,0	0 – 92	9	0,0040	0,89	62,0
83	70,2	0 – 91	7	0,0062	0,90	62,4
103	110,2	0 – 96	5	0,0039	0,82	66,4
104	116,5	0 – 96	10	0,0041	0,82	68,6
105	60,1	0 – 48	7	0,0087	0,91	64,1
106	31,8	0 – 96	10	0,0107	0,73	46,5
127	91,8	0 – 96	12	0,0039	0,85	69,7
145	47,8	0 – 96	5	0,0016	0,45	72,8
151	54,8	n. b.				

n.b.: nicht bestimmt

Der CSB-Abbaugrad  $x_{\text{CSB}}$  lässt sich bei einer vorgegebenen Belüftungsrate unter Verwendung der mittleren Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten mit der Gleichung

$$x_{\text{CSB}} = (1 - \exp(-k \cdot t)) \cdot 100$$

berechnen (Abb. 4.28). Zur Erzielung eines 30 % igen CSB-Abbaus wären demnach bei einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  79 h Belüftungszeit erforderlich, bei einer Belüftungsrate von 10, bzw.  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  67 bzw. 65 h. Die rechnerisch erzielbaren CSB-Abbaugrade liegen damit bei etwa 50 % der BSB<sub>5</sub>-Abbaugrade (s. Kap. 4.1.6).

Tab. 4.18: CSB-Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

V-Nr	CSB <sub>o</sub> [g/kg]	Zeitintervall [h]	Zahl der Messpunkte	k [1/h]	r <sup>2</sup>	T <sub>max</sub> [°C]
28	46,3	0 – 96	9	0,0053	0,78	32,0
29	27,2	0 – 96	10	0,0041	0,67	27,5
30	38,9	0 – 96	12	0,0078	0,90	30,5
46	49,2	0 – 95	13	0,0069	0,86	36,5
48	48,6	0 – 100	12	0,0082	0,91	49,2
53	36,7	0 – 71	9	0,0018	0,30	55,5
68	69,3	0 – 67	5	0,0035	0,77	36,0
72	43,1	0 – 96	6	0,0064	0,87	45,0
116	83,1	0 – 96	12	0,0052	0,87	71,0
117	97,9	0 – 96	12	0,0045	0,85	68,4
118	103,6	0 – 96	9	0,0027	0,56	68,6
119	100,0	0 – 96	10	0,0044	0,80	67,3
120	110,4	0 – 96	12	0,0055	0,84	63,4
121	44,2	0 – 96	11	0,0073	0,72	53,4
124	104,9	0 – 96	5	0,0017	0,95	49,0
125	103,8	0 – 96	11	0,0029	0,83	69,9
126	21,4	0 – 96	7	0,0040	0,70	43,8
128	88,1	0 – 96	8	0,0038	0,88	68,4
132	78,2	0 – 69	4	0,0062	0,90	68,1
133	74,5	0 – 63	4	0,0066	0,87	58,0
134	75,8	0 – 93	5	0,0052	0,69	59,2

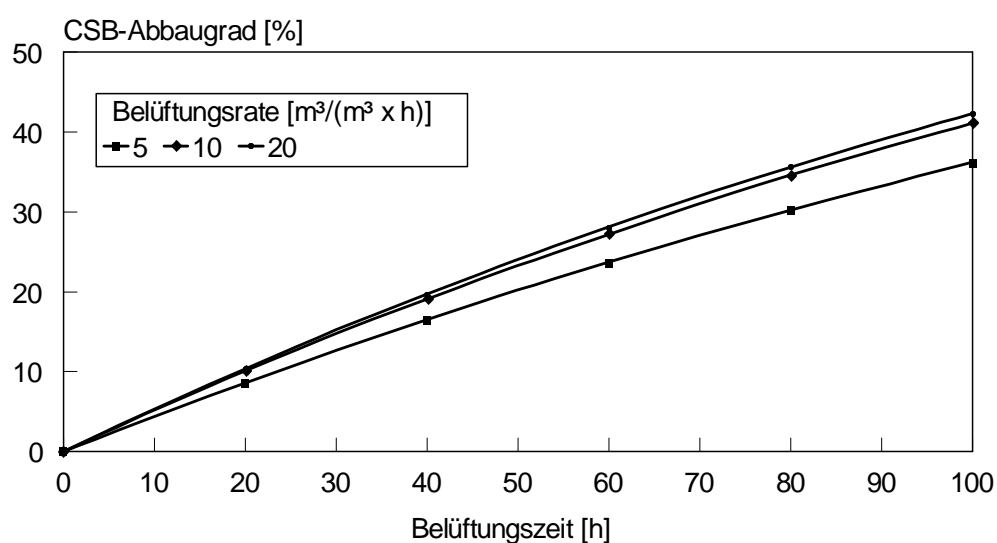


Abb. 4.28: CSB-Abbaugrad bei der Belüftung separierter Schweinegülle in Abhängigkeit von der Belüftungsrate und der Belüftungszeit

Die CSB-Abbaugeschwindigkeit ( $v$ ), die linear abhängig ist von der CSB-Konzentration ( $c$ ), kann mit der Gleichung

$$v = k \cdot c$$

berechnet werden (Tab. 4.19). Die Reaktionsgeschwindigkeits-Konstante  $k$  ist bei Belüftungsrate von mehr als  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  von der bei der Belüftung erzielten Maximaltemperatur abhängig, wie Abb. 4.29 zeigt. Sie steigt im mesophilen Temperaturbereich linear mit der Temperatur an und erreicht bei etwa  $40 - 45 \text{ }^\circ\text{C}$  ihr Maximum. Oberhalb von  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  nimmt die Reaktionsgeschwindigkeits-Konstante stark ab. Diese Befunde dürften im wesentlichen auf die Inaktivierung von Mikroorganismen zurückzuführen sein.

Tab. 4.19: CSB-Abbaugeschwindigkeit bei der Belüftung separierter Schweinegülle in Abhängigkeit von der Belüftungsrate und der CSB-Konzentration, Angaben in  $[\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})]$

CSB $[\text{g}/\text{kg}]$	Belüftungsrate $[\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})]$		
	5 ( $k = 0,0045/\text{h}$ )	10 ( $k = 0,0053/\text{h}$ )	20 ( $k = 0,0055/\text{h}$ )
20	0,09	0,11	0,11
40	0,18	0,21	0,22
60	0,27	0,32	0,33
80	0,36	0,42	0,44
100	0,45	0,53	0,55
120	0,54	0,64	0,66

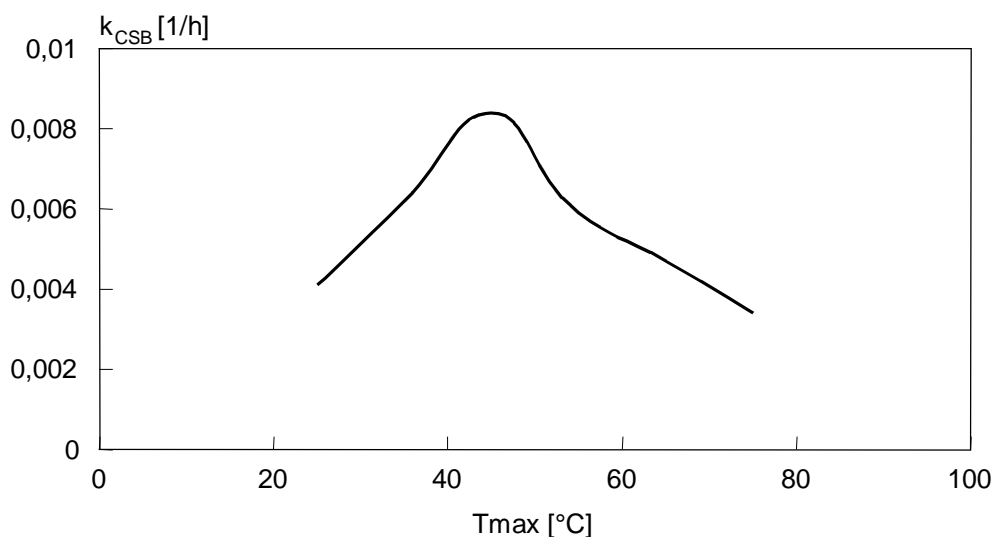


Abb. 4.29: Abhängigkeit der gemittelten CSB-Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten von der bei der Belüftung erzielten Maximaltemperatur bei Belüftungsrate von 10 bis  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

#### 4.1.6 BSB<sub>5</sub>

Der BSB<sub>5</sub>-Abbau während der Belüftung von separierten Schweinegülle unterschiedlicher Herkunft und Zusammensetzung wurde bei Belüftungsraten von 5, 10 und 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) untersucht (Abb. 4.30 – 4.32). Trotz einheitlicher Versuchsbedingungen traten bei den 7 durchgeführten Versuchen mit einer Belüftungsrate von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) deutliche Unterschiede beim BSB<sub>5</sub>-Abbau auf (Abb. 4.30 a und b). Bei den Versuchen 122 und 123 waren nach 96 h erst 16,5 bzw. 9,2 % des BSB<sub>5</sub> abgebaut worden, während bei den Versuchen 50, 130 und 149 mit 89,3 %, 78,9 % und 85,1 % hohe Abbaugrade gemessen wurden. Ein etwa 80 % iger BSB<sub>5</sub>-Abbau wurde in der Mehrzahl der Versuche nach einer Belüftungszeit von etwa 100 h erreicht.

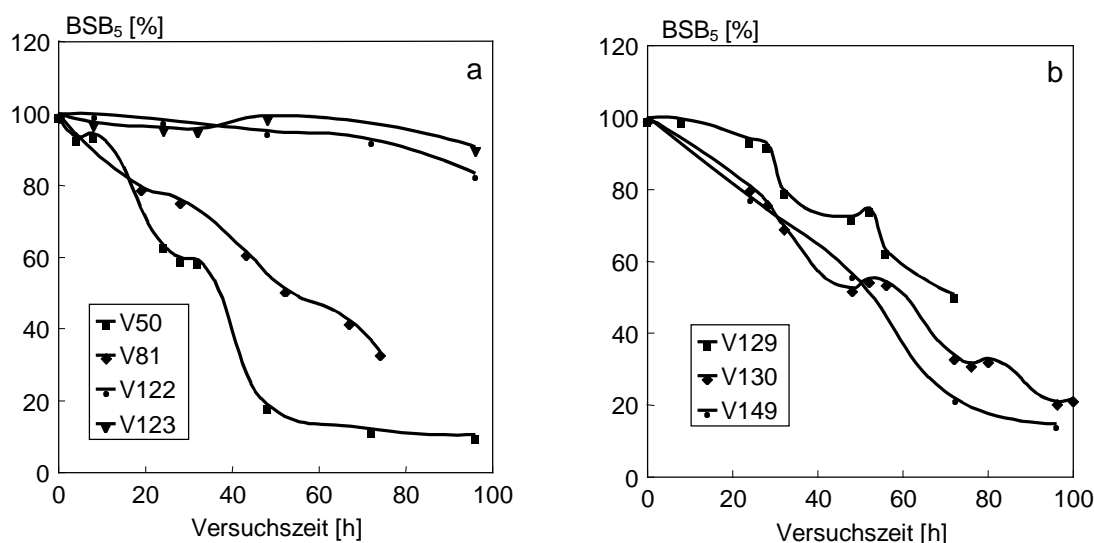


Abb. 4.30.a und b: Verlauf der BSB<sub>5</sub>-Konzentration in Abhängigkeit von der Belüftungszeit bei einer Belüftungsrate von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

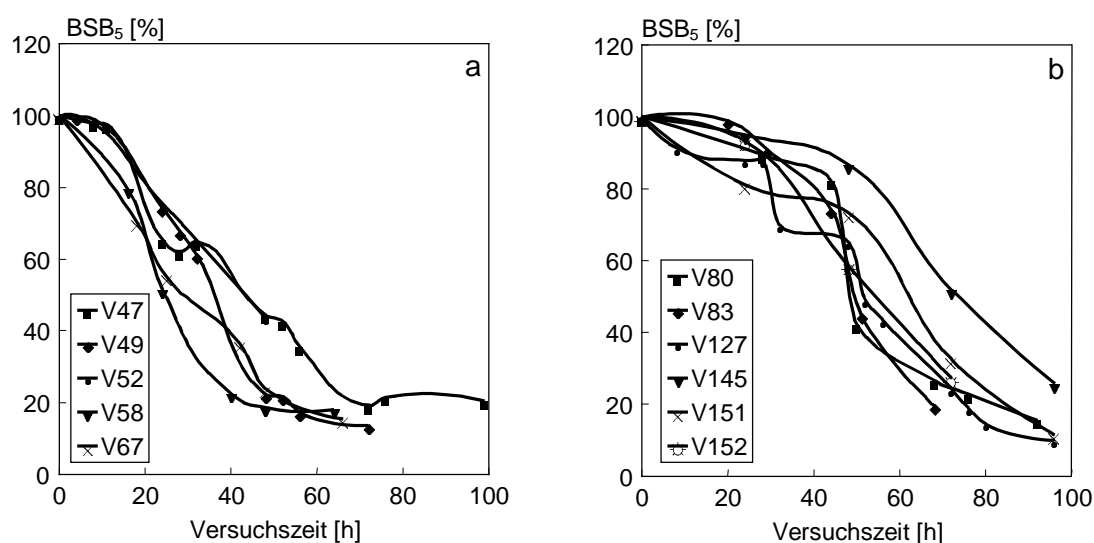


Abb. 4.31 a und b: Verlauf der BSB<sub>5</sub>-Konzentration in Abhängigkeit von der Belüftungszeit bei einer Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

Mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  (Abb. 4.31 a und b) wurden insgesamt 11 Versuche durchgeführt, wobei der Verlauf des Abbaus deutlich geringere Schwankungen aufwies als die bei einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ . Nach ca. 80 h Belüftungszeit waren bei dieser Belüftungsrate bei fast allen Versuchen 80 % des  $\text{BSB}_5$  mineralisiert worden.

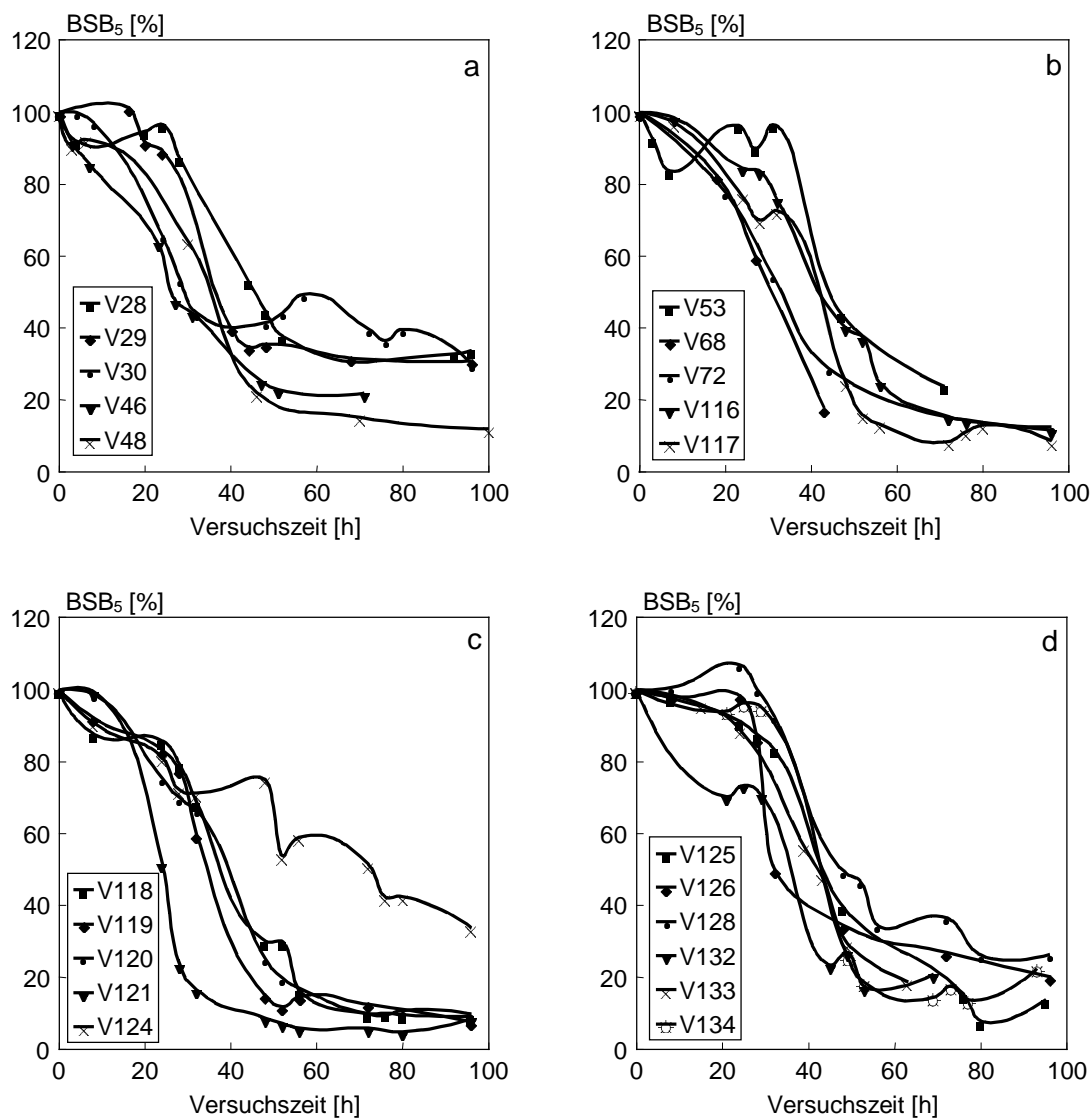


Abb. 4.32 a, b, c und d: Verlauf der  $\text{BSB}_5$ -Konzentration in Abhängigkeit von der Belüftungszeit bei einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$

Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  führten in der Mehrzahl der 21 durchgeführten Versuche zu einer weiteren Beschleunigung des  $\text{BSB}_5$ -Abbaus. Abbaugrade von 80 % wurden in vielen Fällen bereits nach Belüftungszeiten von weniger als 70 h erreicht.

Die mit einer exponentiellen Regression ermittelten Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten sind für Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  in Tab. 4.20 dargestellt. Wegen des offensichtlich untypischen Verlaufs der Versuche 122 und 123 wurden die Ergebnisse dieser Versuche bei



der weiteren Betrachtung nicht berücksichtigt. Die errechneten Konstanten schwankten zwischen 0,0073/h und 0,0254/h. Im Mittel betrug sie 0,016/h.

Tab. 4.20: BSB<sub>5</sub>-Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

V-Nr	BSB <sub>5,0</sub> [g/kg]	Zeitintervall [h]	Zahl der Messpunkte	k [1/h]	r <sup>2</sup>
50	11,8	0 – 96	9	0,0254	0,93
81	22,8	0 – 67	7	0,0131	0,97
122	12,7	0 – 96	6	0,0015	0,85
123	21,7	0 – 96	6	0,0009	0,63
129	39,2	0 – 72	9	0,0073	0,84
130	46,2	0 – 100	12	0,0143	0,95
149	20,1	0 – 96	5	0,0188	0,93

Tab. 4.21: BSB<sub>5</sub>-Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

V-Nr	BSB <sub>5,0</sub> [g/kg]	Zeitintervall [h]	Zahl der Messpunkte	k [1/h]	r <sup>2</sup>
47	15,6	0 – 99	12	0,0181	0,94
49	13,5	0 – 72	10	0,0270	0,90
52	9,6	0 – 48	4	0,0161	0,96
58	12,6	0 – 64	6	0,0305	0,91
67	18,7	0 – 66	6	0,0272	0,97
80	19,6	0 – 92	7	0,0178	0,83
83	22,6	0 – 68	6	0,0161	0,66
127	33,9	0 – 96	12	0,0196	0,84
145	19,8	0 – 96	5	0,0107	0,77
151	21,0	0 – 96	5	0,0179	0,82
152	18,6	0 – 72	4	0,0150	0,84

Bei Belüftungsraten von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) schwankten die Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten (Tab. 4.21) zwischen 0,0107/h und 0,0305/h. Im Mittel lag sie bei 0,020/h und damit deutlich über der mittleren Konstante, die bei einer Belüftungsrate von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) errechnet wurde.

Bei den Versuchen mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) ergaben die Versuche 28, 29 und 30 keine typische Selbsterhitzung, so dass sie für die weitere Betrachtung nicht mehr berücksichtigt wurden. Die Versuche 121 und 124 zeigten ebenfalls deutliche Abweichungen von dem typischen Verlauf des BSB<sub>5</sub>-Abbaus (Abb. 4.32 c), so dass sie ebenfalls nicht für die Bestimmung der Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten herangezogen wurden. Bei den verbleibenden 16 Versuchen schwankten die Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten

zwischen 0,0141/h und 0,0316/h. Im Mittel lag sie bei 0,023/h (Tab. 4.22). Demnach führten Belüftungsraten von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) im Mittel zu einer weiteren Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten.

Der BSB<sub>5</sub>-Abbaugrad  $x_{BSB5}$  lässt sich bei einer vorgegebenen Belüftungsrate unter Verwendung der mittleren Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten mit der Gleichung

$$x_{BSB5} = (1 - \exp(-k \cdot t)) \cdot 100$$

berechnen (Abb. 4.33). Zur Erzielung eines 80 % igen Abbaugrades sind bei Belüftungsraten von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) durchschnittlich 100 h, bei 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) 80 h und bei Belüftungsraten von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) 70 h erforderlich.

Tab. 4.22 BSB<sub>5</sub>-Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

V-Nr	BSB <sub>5,0</sub> [g/kg]	Zeitintervall [h]	Zahl der Messpunkte	k [1/h]	r <sup>2</sup>
28	11,1	0 – 96	10	0,0125	0,83
29	9,3	0 – 96	9	0,0157	0,75
30	10,7	0 – 96	13	0,0137	0,83
46	19,3	0 – 71	9	0,0251	0,94
48	14,8	0 – 100	7	0,0238	0,92
53	8,5	0 – 71	8	0,0154	0,72
68	19,6	0 – 43	4	0,0316	0,78
72	18,7	0 – 96	5	0,0222	0,96
116	32,4	0 – 96	12	0,0224	0,90
117	38,3	0 – 96	12	0,0281	0,88
118	40,2	0 – 96	12	0,0269	0,89
119	37,4	0 – 96	10	0,0293	0,84
120	37,5	0 – 96	12	0,0275	0,91
121	21,7	0 – 96	11	0,0383	0,74
124	43,3	0 – 96	12	0,0104	0,94
125	39,9	0 – 95	9	0,0227	0,83
126	10,4	0 – 96	8	0,0170	0,88
128	37,8	0 – 96	11	0,0141	0,82
132	28,4	0 – 69	8	0,0256	0,83
133	36,1	0 – 63	7	0,0211	0,81
134	29,9	0 – 93	10	0,0224	0,76

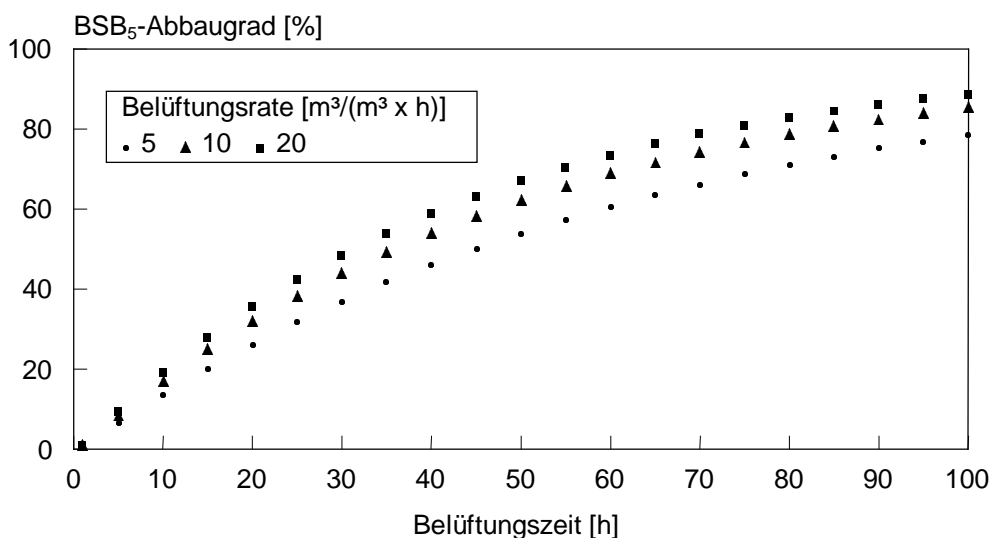


Abb. 4.33: BSB<sub>5</sub>-Abbaugrad bei der Belüftung separierter Schweinegülle in Abhängigkeit von der Belüftungsrate und der Belüftungszeit

#### 4.1.7 Flüchtige organische Säuren

Der Abbau von Essigsäure bei der Belüftung separierter Schweinegülle wurde bei Belüftungsraten von 5 bis 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) untersucht (Abb. 4.34 – 4.36).

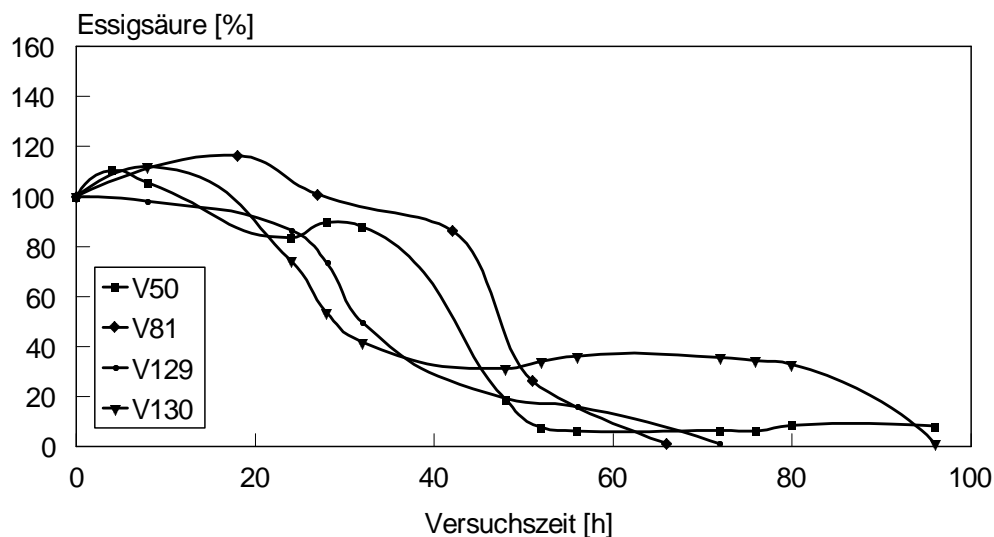


Abb. 4.34: Verlauf der Essigsäure-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

Die Ergebnisse zeigen, dass der Essigsäure-Abbau bei einer Belüftungsrate von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) je nach Güllezusammensetzung nach etwa 50 (V 50) bis 100 h (V 130) abgeschlossen war. Bei Belüftungsraten von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) war Essigsäure nach 40 h (V 58, V 106) bzw. 100 h (V 104) weitgehend abgebaut, bei Belüftungsraten von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) nach etwa 35 h (V 121,

V 126) bzw. 100 h (V 124). Die maximalen Abbauraten bewegten sich bei Belüftungsraten von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  zwischen 2 (V 129) und  $4,1 \text{ %/h}$  (V 50) und lagen im Mittel bei  $2,9 \text{ %/h}$ . Belüftungsraten von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  ergaben maximale Abbauraten von  $2,6 \text{ %/h}$  (V 104) bis  $5,6 \text{ %/h}$  (V 67) bzw.  $4,3 \text{ %/h}$  im Mittel. Belüftungsraten von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  führten zu maximalen Abbauraten von  $2,3 \text{ %/h}$  (V 119) bis  $5,7 \text{ %/h}$  (V 128). Im Mittel betrug die maximale Abbaurate  $4,0 \text{ %/h}$ . Demzufolge lag die Schwankungsbreite maximaler Abbauraten innerhalb einer Belüftungsrate höher als zwischen den Belüftungsraten.

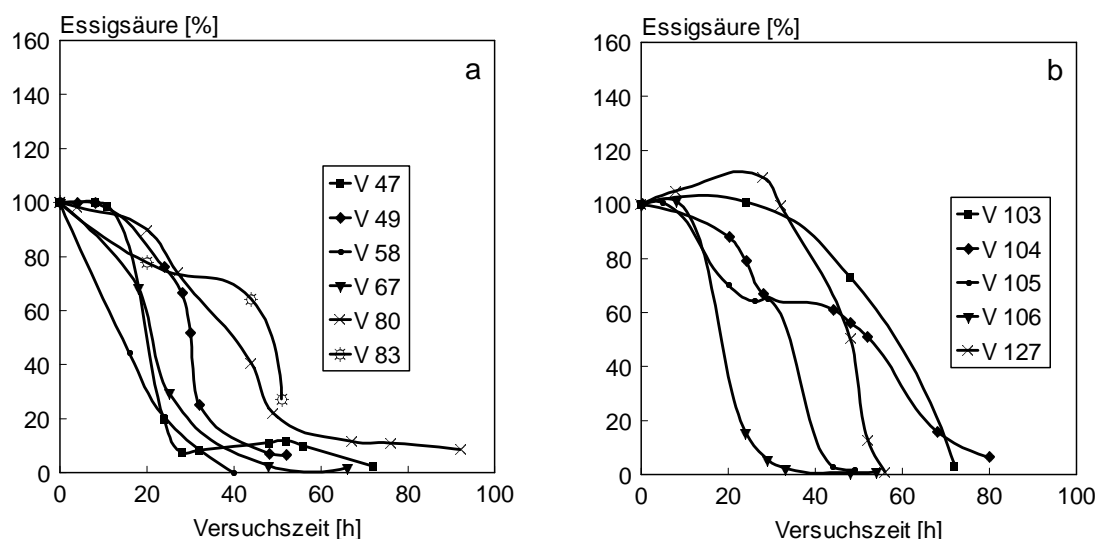


Abb. 4.35 a, b: Verlauf der Essigsäure-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

Bei hohen Essigsäure-Konzentrationen, bzw. hohen TR-Konzentrationen und Belüftungsraten von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  lagen offensichtlich Sauerstofflimitierungen vor. Bei geringeren Essigsäure-Konzentrationen und höheren Belüftungsraten war das nicht der Fall. Für diese Fälle müssen die Ursachen für die Schwankungen der maximalen Abbauraten nicht in einer limitierenden Sauerstoffversorgung, sondern in substratspezifischen Zusammenhängen zu suchen sein. Eine wesentliche Einflussgröße dürfte die Konzentration des Trockenrückstandes darstellen, aus der eine Hydrolyse und Nachversäuerung erfolgt. Je stärker diese ist (bedingt durch hohe TR-Konzentrationen), desto geringer dürften die gemessenen maximalen Abbauraten ausfallen.

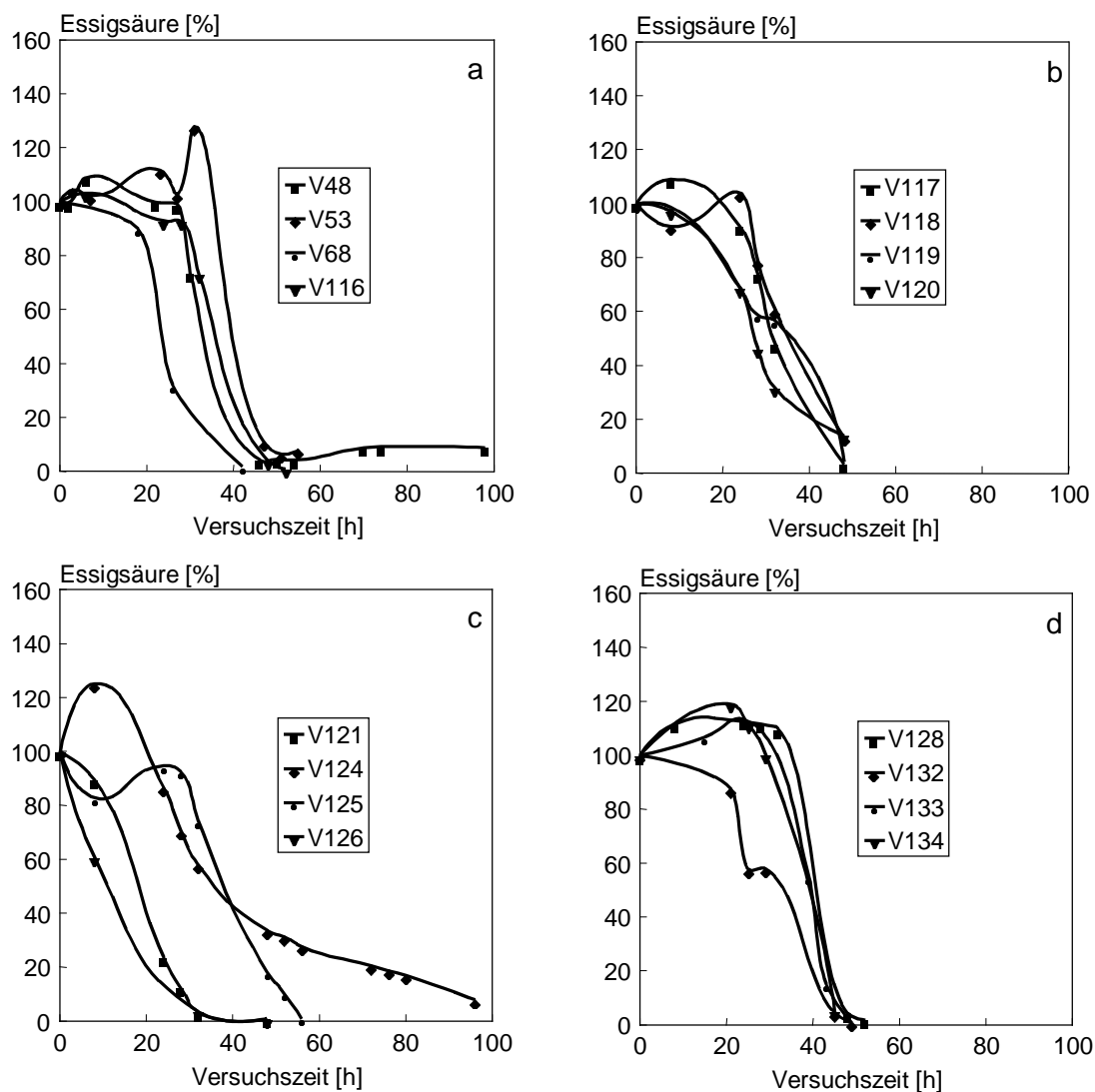


Abb. 4.36 a, b, c, d: Verlauf der Essigsäure-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

Aufgrund o. g. Überlegungen wurde der Essigsäure-Abbau bei allen Versuchen unabhängig von der eingesetzten Belüftungsrate (BLR) ausgewertet. Hierzu wurden für alle Versuche Kurvenanpassungen errechnet und für vergleichbare TR-Konzentrationen gemittelt (Tab. 4.23).

Tab. 4.23: Reduktion der Essigsäure-Konzentrationen ( $y_{C2}$ ) in Abhängigkeit von der Belüftungszeit (x) und des Trockenrückstandes (TR) bei Belüftungsraten von 5 bis 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

V-Nr	BLR [m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·h)]	TR [g/kg]	T <sub>max</sub> [°C]	Funktionsgleichung	r <sup>2</sup>
106	10	17,9	46,5	$y_{C2} = -0,0432 x^2 - 1,8425 x + 100$	0,93
126	10	14,6	43,8	$y_{C2} = 0,0079 x^2 - 5,5467 x + 100$	1,00
121	20	23,9	53,4	$y_{C2} = -0,0353 x^2 - 2,0545 x + 100$	0,98
Mittel		18,8	47,9	$y_{C2} = -0,024 x^2 - 3,148 x + 100$	
50	5	36,4	54,9	$y_{C2} = -0,0488 x^2 + 0,8736 x + 100$	0,97
47	10	34,4	56,5	$y_{C2} = -0,1754 x^2 + 1,3427 x + 100$	0,98
49	10	39,5	55,3	$y_{C2} = -0,028 x^2 + 0,7077 x + 100$	0,91
58	10	39,6	52,5	$y_{C2} = 0,045 x^2 - 4,3087 x + 100$	1,00
105	10	36,8	64,1	$y_{C2} = -0,0326 x^3 - 0,5348 x + 100$	0,97
48	20	37,3	49,2	$y_{C2} = -0,0587 x^2 + 1,0891 x + 100$	0,94
53	20	39,8	55,5	$y_{C2} = -0,0823 x^2 + 2,5235 x + 100$	0,90
Mittel		37,4	55,4	$y_{C2} = -0,054 x^2 + 0,242 x + 100$	
81	5	51,4	n.b.	$y_{C2} = -0,0432 x^2 + 1,22 x + 100$	0,92
83	10	51,8	62,4	$y_{C2} = -0,0153 x^2 - 0,4589 x + 100$	0,88
116	20	46,8	71,0	$y_{C2} = -0,0515 x^2 + 0,852 x + 100$	0,96
132	20	49,3	68,1	$y_{C2} = -0,0345 x^2 - 0,4428 x + 100$	0,96
133	20	47,5	58,0	$y_{C2} = -0,0921 x^2 + 2,3353 x + 100$	0,96
134	20	49,7	59,0	$y_{C2} = -0,128 x^2 + 3,676 x + 100$	1,00
Mittel		49,4	63,7	$y_{C2} = -0,061 x^2 + 1,197 x + 100$	
129	5	65,2	n.b.	$y_{C2} = -0,0051 x^2 - 1,1213 x + 100$	0,93
130	5	63,9	67,7	$y_{C2} = -0,0072 x^2 - 1,5597 x + 100$	0,84
127	10	63,1	69,7	$y_{C2} = -0,0738 x^2 + 2,3389 x + 100$	0,98
67	10	64,2	55,9	$y_{C2} = -0,0124 x^2 - 2,6542 x + 100$	0,95
68	20	58,5	56,0	$y_{C2} = -0,035 x^2 - 0,9664 x + 100$	0,89
117	20	63,9	68,4	$y_{C2} = -0,0347 x^2 - 0,0654 x + 100$	0,94
119	20	62,7	67,3	$y_{C2} = -0,019 x^2 - 0,8684 x + 100$	0,98
128	20	61,5	68,4	$y_{C2} = -0,0837 x^2 + 2,583 x + 100$	0,94
Mittel		62,9	64,8	$y_{C2} = -0,0339 x^2 - 0,289 x + 100$	
103	10	68,4	66,4	$y_{C2} = -0,0304 x^2 + 0,8571 x + 100$	1,00
104	10	72,4	68,6	$y_{C2} = -0,0013 x^2 - 0,9514 x + 100$	0,96
118	20	76,2	68,6	$y_{C2} = -0,042 x^2 + 0,3964 x + 100$	0,95
125	20	69,9	69,9	$y_{CE} = -0,0448 x^2 + 0,6388 x + 100$	0,95
Mittel		71,7	68,4	$y_{C2} = -0,030 x^2 + 0,235 x + 100$	
120	20	88,6	63,4	$y_{C2} = -0,0032 x^2 - 1,6723 x + 100$	0,96
124	20	105,7	49,0	$y_{C2} = 0,0034 x^2 - 1,334 x + 100$	0,88
Mittel		97,3	56,2	$y_{C2} = 0,0001 x^2 - 1,50 x + 100$	

Werden die zu bestimmten Zeitpunkten ermittelten Essigsäure-Konzentrationen gegen die TR-Konzentrationen aufgetragen und wird eine erneute Kurvenanpassung durchgeführt,

lässt sich der Einfluss beliebiger TR-Konzentrationen auf die Essigsäure-Konzentration berechnen und graphisch darstellen (Abb. 4.37 a, b). Die Ergebnisse zeigen, dass ein vollständiger Essigsäure-Abbau mit steigenden TR-Konzentrationen in der Gülle längere Belüftungszeiten erfordert. Ferner nehmen - bedingt durch die Nachversäuerung - die maximalen Abbauraten mit steigenden TR-Konzentrationen ab (Tab. 4.24). Auffallend ist, dass in unter weitgehend mesophilen Bedingungen (TR bis etwa 30 g/kg) die maximalen Abbauraten mit steigenden TR-Konzentrationen von 6,1 %/h auf 2,3 %/h abfielen, so dass von einer relativ hohen Nachversäuerungs-Geschwindigkeit auszugehen ist. Wurden thermophile Konditionen erreicht (TR: 40 –50 g/kg), stiegen die maximalen Abbauraten wieder auf 3,5 bis 3,7 %/h an. Dies kann sowohl an einer Inhibierung der Hydrolyse und Versäuerung als auch an einer Beschleunigung des oxidativen Abbaus liegen. Bei TR-Konzentrationen von 60 g/kg und mehr nahmen die Abbauraten wieder deutlich ab, was auf eine thermische Inaktivierung der Mikroorganismen zurückzuführen sein dürfte.

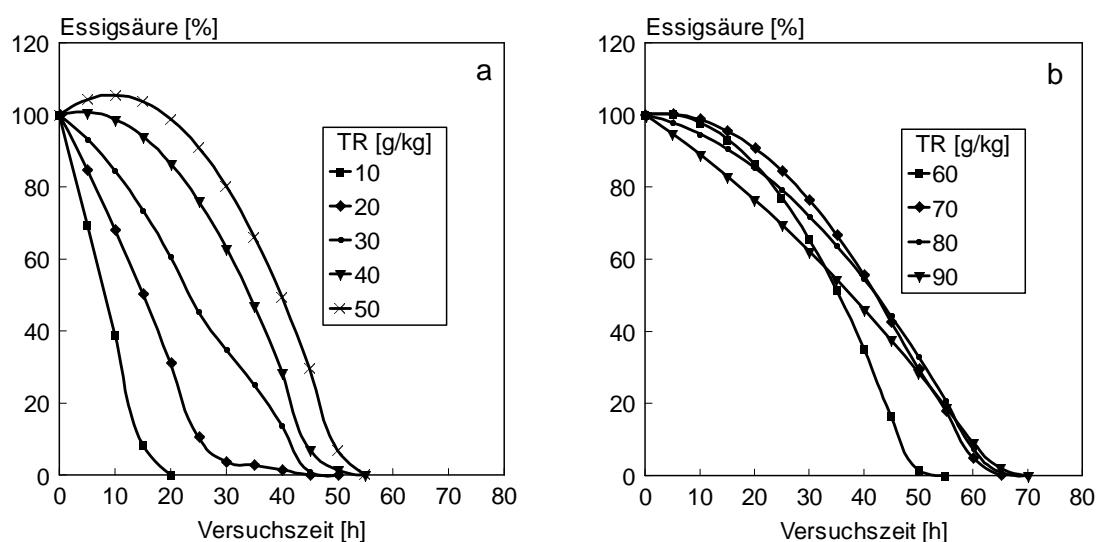


Abb. 4.37 a, b: Errechneter Verlauf der Essigsäure-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle in Abhängigkeit der TR-Konzentration bei Belüftungsraten von 5 bis 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

Tab. 4.24: Maximale Abbaurate und Abbaugrad von Essigsäure bei der Belüftung separierter Schweinegülle in Abhängigkeit der TR-Konzentration

TR [g/kg]	Nettoabbau <sup>1</sup> nach [h]	Maximale Abbaurrate [%/h]	Zeitraum [h]	Abbaugrad ≥ 90 % nach [h]	T <sub>max</sub> [°C]
10	0	6,1	0 – 15	15	38,6
20	0	3,5	0 – 25	31	47,4
30	0	2,3	0 – 45	41	54,5
40	3	3,5	25 – 45	46	59,8
50	19	3,7	30 – 50	50	63,5
60	4	3,0	25 – 45	48	65,4
70	2	2,4	30 – 60	58	65,6
80	0	2,4	40 – 60	60	64,1
90	0	1,7	20 – 60	60	60,9

1: Essigsäure-Konzentration ≤ 100 %

Der Abbau von Propionsäure wurde bei Belüftungsraten von 5 bis 20  $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  untersucht (Abb. 4.38 – 4.40).

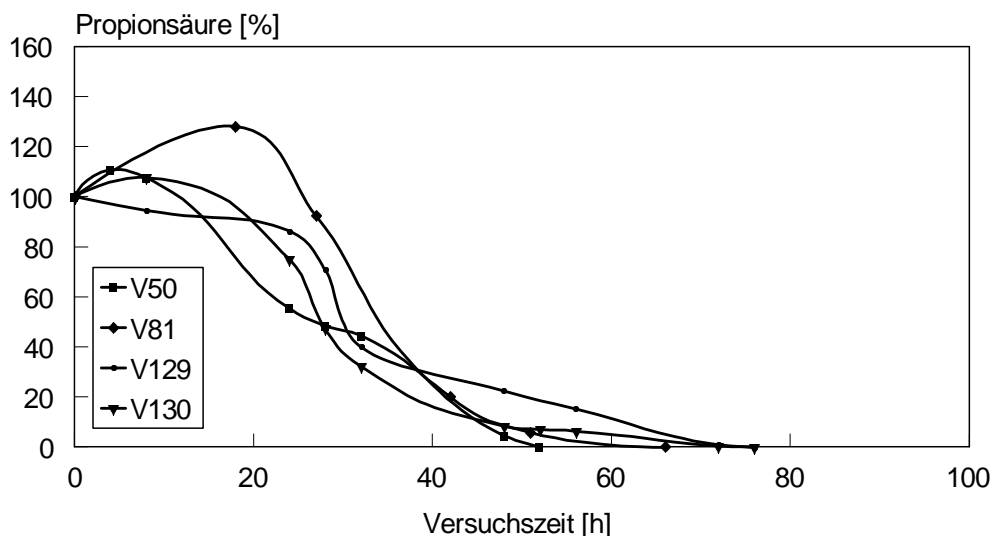


Abb. 4.38: Verlauf der Propionsäure-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 5  $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$

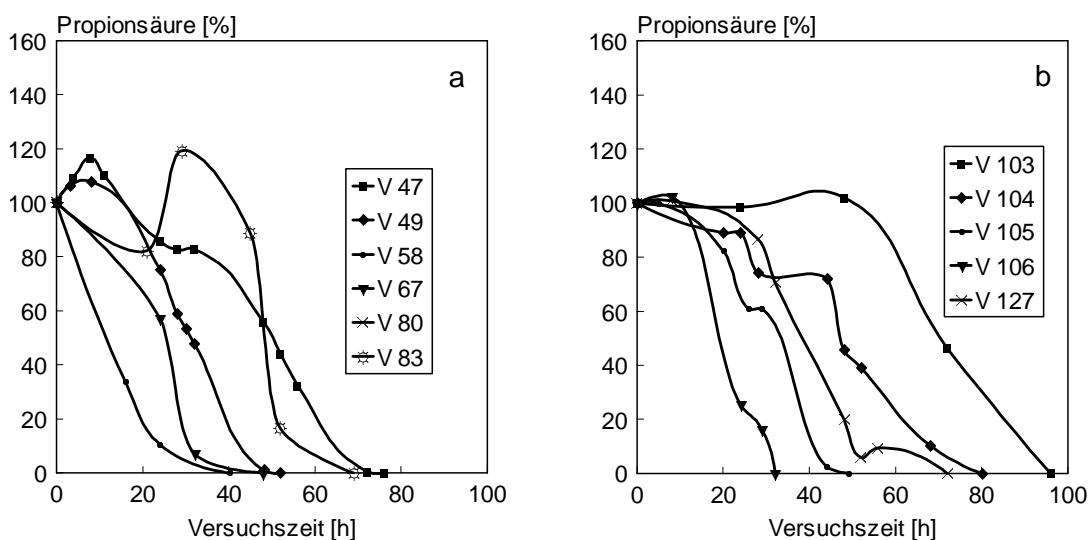


Abb. 4.39 a, b: Verlauf der Propionsäure-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 10  $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$

Belüftungsraten von 5  $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  ergaben einen vollständigen Propionsäure - Abbau nach 52 h (V 50) bzw. 76 h (V 129, V 130). Die maximalen Abbauraten schwankten zwischen 2,4 %/h (V 50) und 5,8 %/h (V 130) und lagen im Mittel aller Versuche bei 4,5 %/h. Der Propionsäure-Abbau bei Belüftungsraten von 10  $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  war nach 32 h (V 106) bzw. 72 h (V 127) abgeschlossen. Die maximalen Abbauraten bewegten sich zwischen 1,6 %/h (V 104) und 6,3 %/h (V 67), wobei die Ergebnisse des Versuchs 83 nicht berücksichtigt wurden. Im Mittel betrug die maximale Abbaurrate 3,4 %/h. Bei Belüftungsraten von 20  $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  war der



Abbau von Propionsäure nach 32 h (V 121) bzw. 56 h (V 118) abgeschlossen. Die maximalen Abbauraten schwankten zwischen 2,9 %/h (V 120, V 126) und 7,8 %/h (V 118), im Mittel aller Versuche lag die maximale Abbaurates bei 4,5 %/h.

Da auch im Falle des Propionsäure-Abbaus die Belüftungsrate offensichtlich keinen entscheidenden Einfluss auf die Geschwindigkeit des Abbaus hatte, wurde die Auswertung in Abhängigkeit der TR-Konzentration durchgeführt. Die Funktionsgleichungen der einzelnen Versuche wurden für vergleichbare TR-Konzentrationen gemittelt (Tab. 4.25). Werden die zu bestimmten Zeitpunkten ermittelten Propionsäure-Konzentrationen gegen die TR-Konzentrationen aufgetragen und wird eine erneute Kurvenanpassung durchgeführt, lässt sich der Einfluss beliebiger TR-Konzentrationen auf die Propionsäure-Konzentration berechnen und graphisch darstellen (Abb. 4.41 a, b).

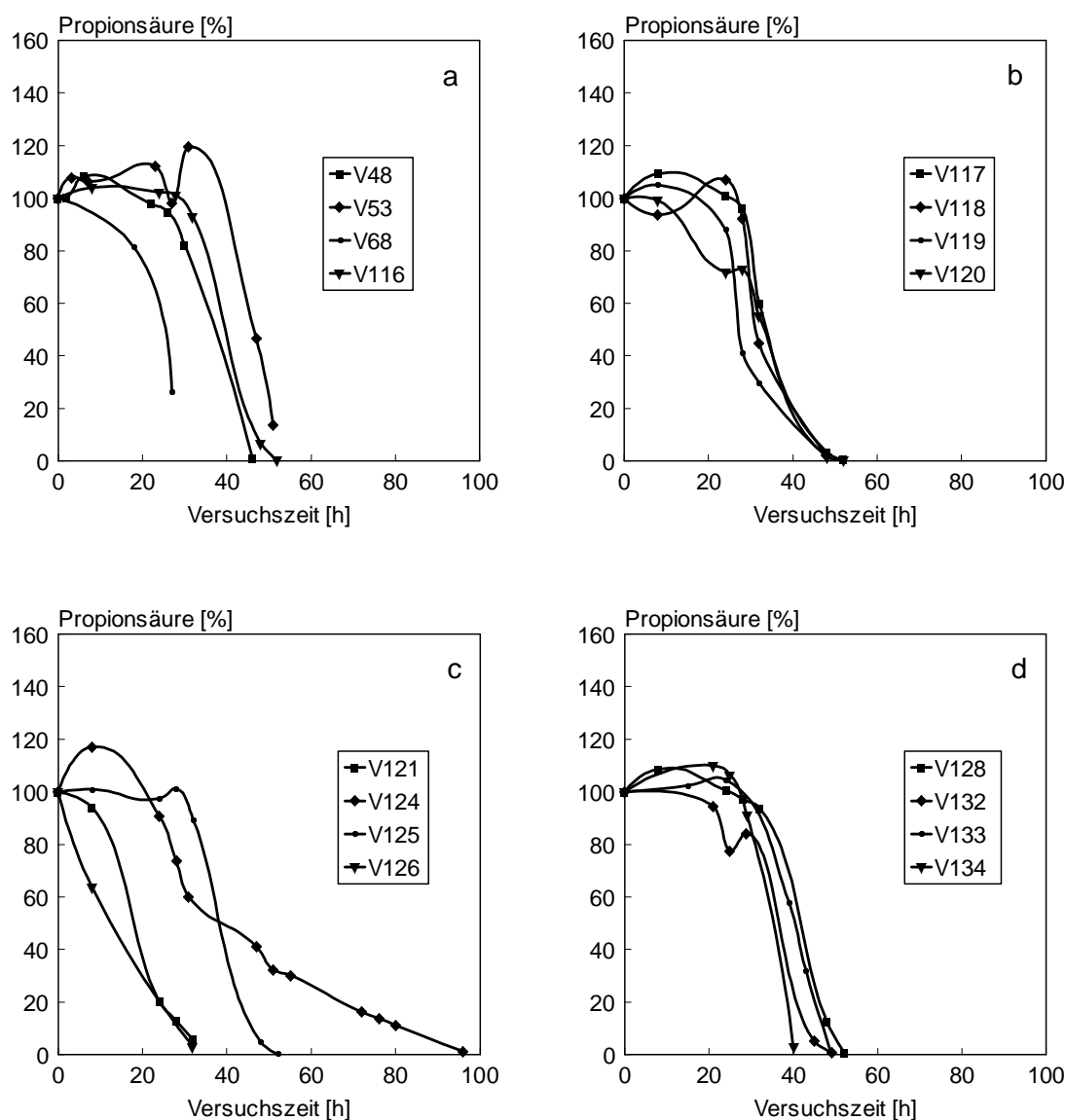


Abb. 4.40 a, b, c, d: Verlauf der Propionsäure-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

Tab. 4.25: Reduktion der Propionsäure-Konzentrationen ( $y_{C3}$ ) in Abhängigkeit von der Belüftungszeit (x) und des Trockenrückstandes (TR) bei Belüftungsraten von 5 bis 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

V-Nr	BLR [m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·h)]	TR [g/kg]	T <sub>max</sub> [°C]	Funktionsgleichung	r <sup>2</sup>
106	10	17,9	46,5	$y_{C3} = -0,1131 x^2 + 0,1276 x + 100$	0,96
126	10	14,6	43,8	$y_{C3} = 0,0625 x^2 - 5,025 x + 100$	1,00
121	20	23,9	53,4	$y_{C3} = -0,0354 x^2 - 0,1888 x + 100$	0,96
Mittel		18,8	47,9	$y_{C3} = -0,029 x^2 - 1,695 x + 100$	
50	5	36,4	54,9	$y_{C3} = -0,0155 x^2 - 1,204 x + 100$	0,95
47	10	34,4	56,5	$y_{C3} = -0,0225 x^2 + 0,157x + 100$	0,96
49	10	39,5	55,3	$y_{C3} = -0,0404 x^2 - 0,1987 x + 100$	0,97
58	10	39,6	52,5	$y_{C3} = 0,0518 x^2 - 4,973 x + 100$	1,00
105	10	36,8	64,1	$y_{C3} = -0,0511 x^3 + 0,0298 x + 100$	0,99
48	20	37,3	49,2	$y_{C3} = -0,0912 x^2 + 2,074 x + 100$	1,00
53	20	39,8	55,5	$y_{C3} = -0,0803 x^2 + 2,537 x + 100$	1,00
Mittel		37,7	55,4	$y_{C3} = -0,036 x^2 - 0,225 x + 100$	
81	5	51,4	n.b.	$y_{C3} = -0,0816 x^2 + 2,0457 x + 100$	0,91
83	10	51,8	62,4	$y_{C3} = -0,0577 x^2 + 1,7699 x + 100$	0,64
116	20	46,8	71,0	$y_{C3} = -0,0806 x^2 + 2,153 x + 100$	0,98
132	20	49,3	68,1	$y_{C3} = -0,0649 x^2 + 1,0244 x + 100$	0,97
133	20	47,5	58,0	$y_{C3} = -0,079 x^2 + 1,886 x + 100$	0,99
134	20	49,7	59,0	$y_{C3} = -0,1678 x^2 + 4,3495 x + 100$	0,99
Mittel		49,4	63,7	$y_{C3} = -0,089x^2 + 2,204 x + 100$	
129	5	65,2	n.b.	$y_{C3} = -0,0023 x^2 - 1,3061 x + 100$	0,92
130	5	63,9	67,7	$y_{C3} = -0,0075 x^2 - 2,052 x + 100$	0,91
127	10	63,1	69,7	$y_{C3} = -0,0393 x^2 + 0,3846 x + 100$	0,97
67	10	64,2	55,9	$y_{C3} = -0,1396 x^2 + 1,5667 x + 100$	1,00
68	20	58,5	56,0	$y_{C3} = -0,1855 x^2 + 2,3593 x + 100$	1,00
117	20	63,9	68,4	$y_{C3} = -0,0667 x^2 + 1,3803 x + 100$	0,96
119	20	62,7	67,3	$y_{C3} = -0,0311 x^2 - 0,686 x + 100$	0,87
128	20	61,5	68,4	$y_{C3} = -0,0779 x^2 + 2,0639 x + 100$	0,99
Mittel		62,9	64,8	$y_{C3} = -0,0669 x^2 + 0,464 x + 100$	
103	10	68,4	66,4	$y_{C3} = -0,0221 x^2 + 0,8922 x + 100$	0,90
104	10	72,4	68,6	$y_{C3} = -0,0165 x^2 - 0,2118 x + 100$	0,95
118	20	76,2	68,6	$y_{C3} = -0,0107 x^2 - 0,8769 x + 100$	0,78
125	20	69,9	69,9	$y_{C3} = -0,0763 x^2 + 1,9228 x + 100$	0,97
Mittel		71,7	68,4	$y_{C3} = -0,0314 x^2 + 0,432 x + 100$	
120	20	88,6	63,4	$y_{C3} = -0,0354 x^2 - 0,1888 x + 100$	0,99
124	20	105,7	49,0	$y_{C3} = 0,0010 x^2 - 1,1913 x + 100$	0,92
Mittel		97,3	56,2	$y_{C3} = -0,0172 x^2 - 0,690 x + 100$	

Die Ergebnisse zeigen, dass der Propionsäure-Abbau mit steigenden TR-Konzentrationen längere Belüftungszeiten erforderte (Tab. 4.26). Im Vergleich zum Essigsäure-Abbau wurde Propionsäure bei geringen TR-Konzentrationen (TR= 10 g/kg) erheblich langsamer oxidiert (2,8 %/h gegenüber 6,1 %/h). Mit steigenden TR-Konzentrationen glichen sich die maximalen Abbauraten zunächst an, bei TR-Konzentrationen von 50 g/kg und mehr wurde

Propionsäure scheinbar mit einer höheren maximalen Abbaurate oxidiert als Essigsäure. Mit steigenden TR-Konzentrationen muß jedoch die Hydrolyse und die Nachversäuerung aus organischen Feststoffen berücksichtigt werden, wobei Essigsäure, Propionsäure und die anderen organischen Säuren in unterschiedlicher Menge entstehen. Sie haben direkten Einfluss auf die maximale Abbaurate, die gemessen wird. In separierter Schweinegülle liegen die organischen Säuren in folgendem Verhältnis vor: C2: C3: IC4: C4: IC5: C<sub>5</sub> = 66: 25: 6: 10: 5: 1. Es ist dementsprechend davon auszugehen, dass bei der Nachversäuerung organische Säuren in einem vergleichbaren Verhältnis nachgebildet werden. Wird jedoch deutlich mehr Essigsäure als Propionsäure nachgeliefert (66: 25 oder 2,64: 1), muß trotz höherer Abbaurate der Essigsäure gegenüber der Propionsäure (6,1 %/h gegenüber 2,8 %/h oder 2,18: 1 bei feststoffarmer Gülle) die maximale Abbaurate der Essigsäure im Vergleich zu der von Propionsäure sinken.

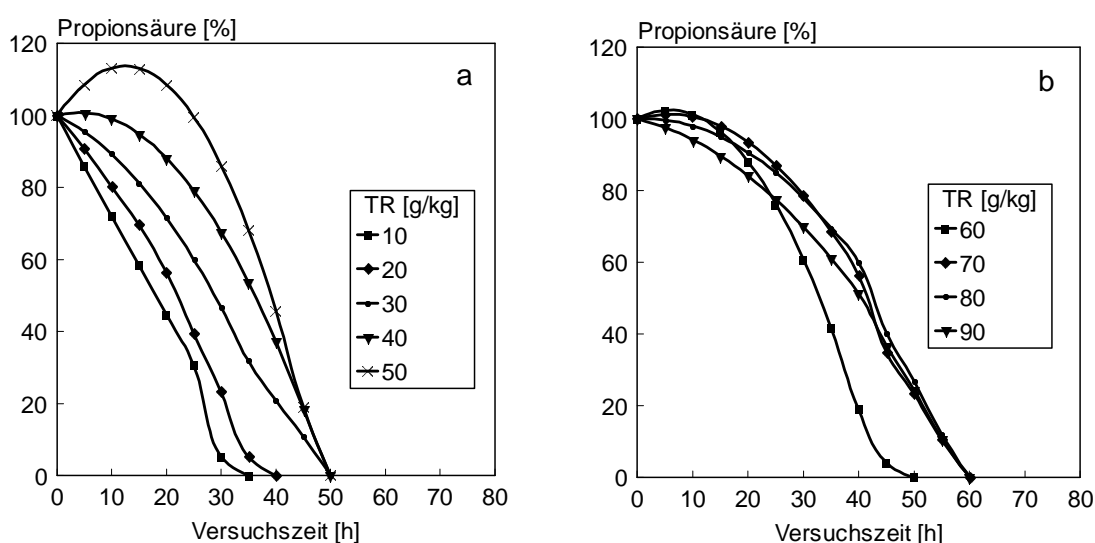


Abb. 4.41 a, b: Errechneter Verlauf der Propionsäure-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle in Abhängigkeit der TR-Konzentration bei Belüftungsraten von 5 bis 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

Tab. 4.26: Maximale Abbaurate und Abbaugrad von Propionsäure bei der Belüftung separierter Schweinegülle in Abhängigkeit der TR-Konzentration

TR [g/kg]	Nettoabbau <sup>1</sup> nach [h]	Maximale Abbaurrate [%/h]	Zeitraum [h]	Abbaugrad ≥ 90 % nach [h]	T <sub>max</sub> [°C]
10	0	2,8	0 – 25	31	38,6
20	0	3,2	15 – 35	38	47,4
30	0	2,6	20 – 35	44	54,5
40	8	3,6	35 – 50	47	59,8
50	25	4,4	30 – 50	47	63,5
60	10	3,8	30 – 50	43	65,4
70	11	2,6	25 – 60	54	65,6
80	8	2,9	35 – 60	56	64,1
90	0	2,6	40 – 60	56	60,9

1: Propionsäure-Konzentration ≤ 100 %

Der Abbau von Iso-Buttersäure bei der Belüftung separierter Schweinegülle wurde bei Belüftungsraten von 5 bis 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) untersucht (Abb. 4.42 – 4.44).

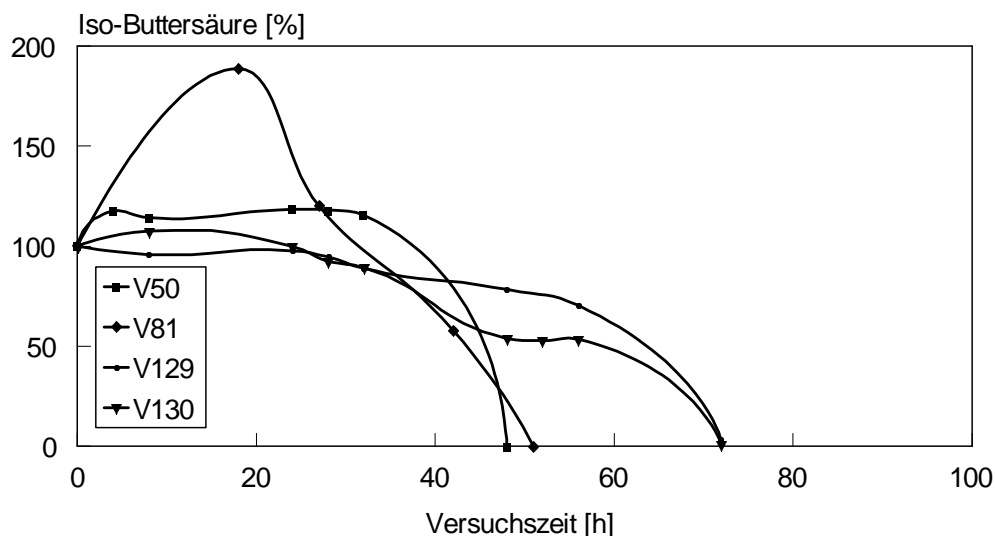


Abb. 4.42: Verlauf der Iso-Buttersäure-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

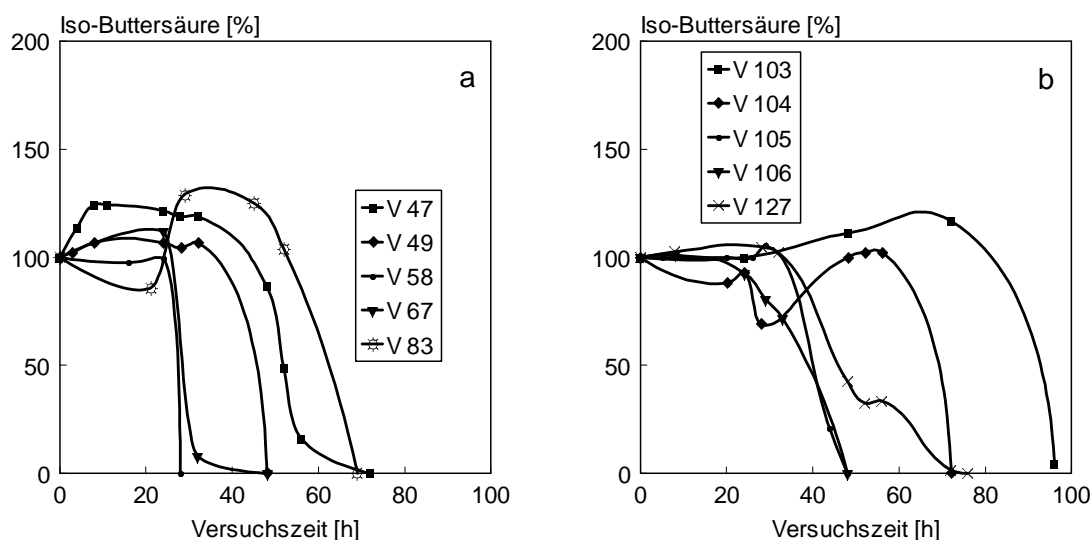


Abb. 4.43 a, b: Verlauf der Iso-Buttersäure-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

Bei Belüftungsraten von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) wurden für Iso-Buttersäure maximale Abbauraten von 3,3 (V 130) bis 7,2 %/h (V 50) ermittelt. Im Mittel betrug die maximale Abbaurate 5 %/h. Abgeschlossen war der Abbau dieser flüchtigen, organischen Säure nach 48 h (V 50) bzw. 72 h (V 129, V 130). Der Iso-Buttersäure-Abbau bei Belüftungsraten von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) war nach 28 h (V 58) bzw. mehr als 96 h (V 103) beendet. Die maximalen Abbauraten bewegten sich zwischen 2,3 %/h (V 127) und 24,8 %/h (V 58). Im Mittel lag die maximale Abbaurate bei

8,2 %/h. Belüftungsraten von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  ergaben maximale Abbauraten von 2,0 %/h (V 124) bis 22,4 %/h (V 128). Im Mittel betrug die maximale Abbaurate 8,8 %/h. Der Abbau dieser organischen Säure war nach 32 h (V 126) bzw. 96 h (V 124) abgeschlossen.

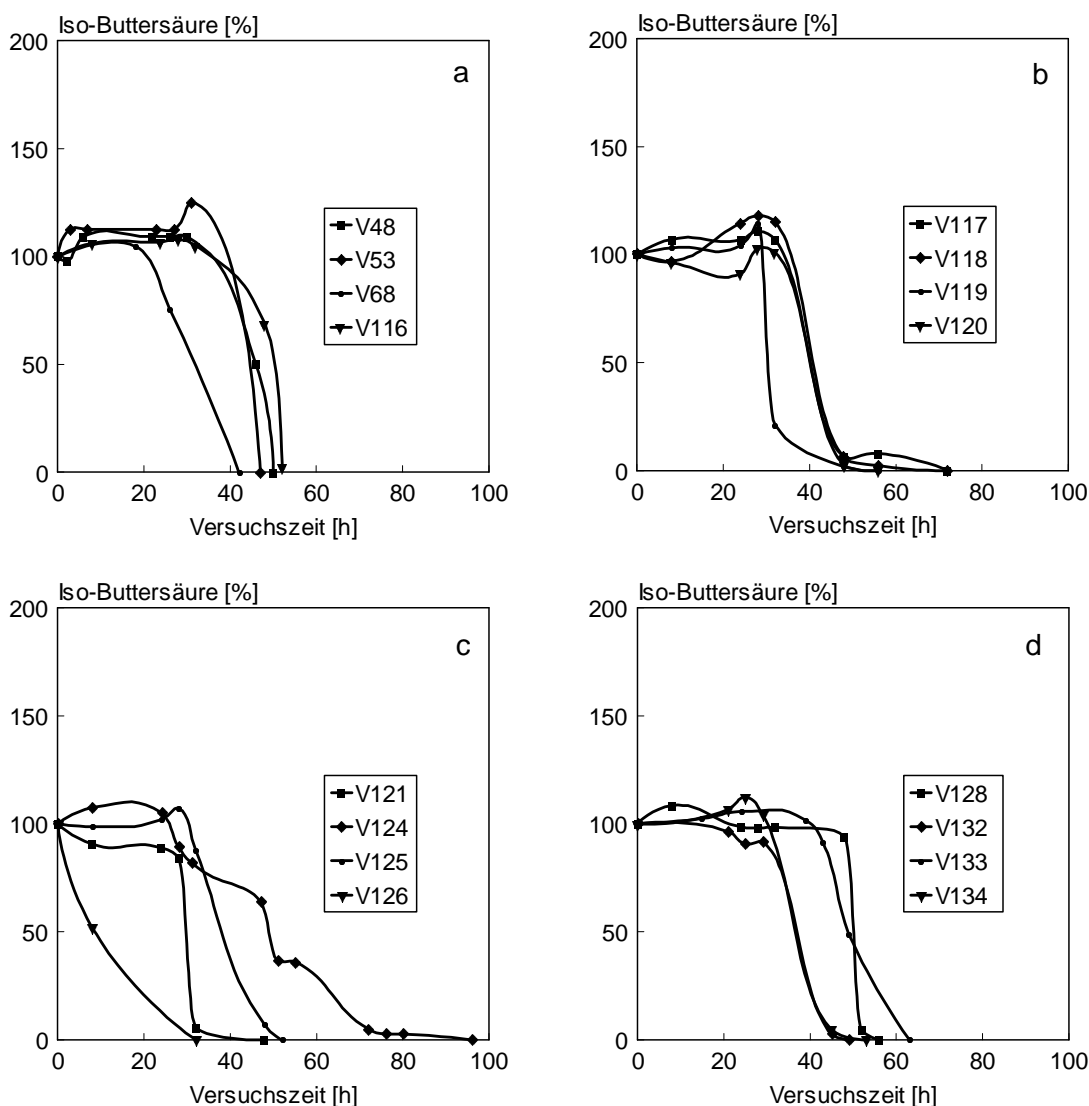


Abb. 4.44 a, b, c, d: Verlauf der Iso-Buttersäure-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$

Aufgrund o. g. Überlegungen wurde auch der Iso-Buttersäure-Abbau bei allen Versuchen unabhängig von der eingesetzten Belüftungsrate (BLR) ausgewertet. Hierzu wurden für alle Versuche Kurvenanpassungen errechnet und für vergleichbare TR-Konzentrationen gemittelt (Tab. 4.27). Werden die zu bestimmten Zeitpunkten ermittelten Iso-Buttersäure-Konzentrationen gegen die TR-Konzentrationen aufgetragen und wird eine erneute Kurvenanpassung durchgeführt, lässt sich der Einfluss beliebiger TR-Konzentrationen auf die Iso-Buttersäure-Konzentration berechnen und graphisch darstellen (Abb. 4.45 a, b).

Der Netto-Abbau von Iso-Buttersäure setzte mit zunehmenden TR-Konzentrationen zeitverzögert ein und war entsprechend später erst abgeschlossen. Bei einer TR-

Konzentration von 10 g/kg setzte der Abbau sofort ein und war nach 36 h abgeschlossen, während er bei TR-Konzentrationen von 50 g/kg erst nach 33 h einsetzte und nach 52 h abgeschlossen war. Bei geringen TR-Konzentrationen war die maximale Abbaurate mit 1,9 bis 2,5 %/h eher gering, während sie bei höheren TR-Konzentrationen – aber deutlich zeitversetzt – mit Werten um 4 %/h deutlich höher ausfiel (Tab. 4.28).

Tab. 4.27: Reduktion der Iso-Buttersäure-Konzentrationen ( $y_{IC4}$ ) in Abhängigkeit von der Belüftungszeit (x) und des Trockenrückstandes (TR) bei Belüftungsraten von 5 bis 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

V-Nr	BLR [m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·h)]	TR [g/kg]	T <sub>max</sub> [°C]	Funktionsgleichung	r <sup>2</sup>
106	10	17,9	46,5	$y_{IC4} = -0,0728 x^2 + 1,4424 x + 100$	0,99
126	10	14,6	43,8	$y_{IC4} = 0,1203 x^2 - 6,975 x + 100$	1,00
121	20	23,9	53,4	$y_{IC4} = -0,0411 x^2 - 0,2527 x + 100$	0,72
Mittel		18,8	47,9	$y_{IC4} = 0,0021 x^2 - 1,93 x + 100$	
50	5	36,4	54,9	$y_{IC4} = -0,1291 x^2 + 4,2011 x + 100$	0,97
47	10	34,4	56,5	$y_{IC4} = -0,0778 x^2 + 3,0631 x + 100$	0,95
49	10	39,5	55,3	$y_{IC4} = -0,106 x^2 + 3,1101 x + 100$	0,95
58	10	39,6	52,5	$y_{IC4} = -0,3176 x^2 + 6,067 x + 100$	0,71
105	10	36,8	64,1	$y_{IC4} = -0,0928 x^3 + 2,3726 x + 100$	0,96
48	20	37,3	49,2	$y_{IC4} = -0,0894 x^2 + 2,7255 x + 100$	0,95
53	20	39,8	55,5	$y_{IC4} = -0,1296 x^2 + 4,0827 x + 100$	0,93
Mittel		37,7	55,4	$y_{IC4} = -0,134 x^2 + 3,66 x + 100$	
81	5	51,4	n.b.	$y_{IC4} = -0,1582 x^2 + 5,9089 x + 100$	0,90
83	10	51,8	62,4	$y_{IC4} = -0,0534 x^2 + 2,4757 x + 100$	0,74
116	20	46,8	71,0	$y_{IC4} = -0,0732 x^2 + 2,3402 x + 100$	0,92
132	20	49,3	68,1	$y_{IC4} = -0,0933 x^2 + 2,0776 x + 100$	0,98
133	20	47,5	58,0	$y_{IC4} = -0,0465 x^2 + 1,5354 x + 100$	0,73
134	20	49,7	59,0	$y_{IC4} = -0,1212 x^2 + 3,3824 x + 100$	0,98
Mittel		49,4	63,7	$y_{IC4} = -0,091 x^2 + 2,95 x + 100$	
129	5	65,2	n.b.	$y_{IC4} = -0,0263 x^2 + 0,682 x + 100$	0,94
130	5	63,9	67,7	$y_{IC4} = -0,0257 x^2 + 0,4759 x + 100$	0,98
127	10	63,1	69,7	$y_{IC4} = -0,0214 x^2 + 0,1575 x + 100$	0,91
67	10	64,2	55,9	$y_{IC4} = -0,0484 x^2 + 0,039 x + 100$	0,67
68	20	58,5	56,0	$y_{IC4} = -0,1013 x^2 + 1,8535 x + 100$	1,00
117	20	63,9	68,4	$y_{IC4} = -0,073 x^2 + 2,1562 x + 100$	0,91
119	20	62,7	67,3	$y_{IC4} = -0,0766 x^2 + 1,4865 x + 100$	0,70
128	20	61,5	68,4	$y_{IC4} = -0,0542 x^2 + 1,6137 x + 100$	0,63
Mittel		62,9	64,8	$y_{IC4} = -0,053 x^2 + 1,058 x + 100$	
103	10	68,4	66,4	$y_{IC4} = -0,0254 x^2 + 1,5962 x + 100$	0,77
104	10	72,4	68,6	$y_{IC4} = -0,0241 x^2 + 0,801 x + 100$	0,44
118	20	76,2	68,6	$y_{IC4} = -0,0828 x^2 + 2,6284 x + 100$	0,89
125	20	69,9	69,9	$y_{IC4} = -0,0885 x^2 + 2,3713 x + 100$	0,95
Mittel		71,7	68,4	$y_{IC4} = -0,055 x^2 + 1,85 x + 100$	
120	20	88,6	63,4	$y_{IC4} = -0,0868 x^2 + 2,2682 x + 100$	0,89
124	20	105,7	49,0	$y_{IC4} = -0,0068 x^2 - 0,6114 x + 100$	0,90
Mittel		97,3	56,2	$y_{IC4} = -0,047 x^2 + 0,828 x + 100$	

Bei TR-Konzentrationen von 10 g/kg, bei denen die Nachversäuerung zu vernachlässigen ist, lag die maximale Abbaurrate für Iso-Buttersäure bei 2,5 %/h. Gegenüber Propionsäure, bei der die maximale Abbaurrate unter vergleichbaren Bedingungen bei 2,8 %/h lag, wurde Iso-Buttersäure dementsprechend mit einer um 11 % geringeren Abbaurrate oxidiert. Noch deutlicher werden die Unterschiede in den Abbauraten bei einem Vergleich des Essigsäure-Abbaus mit dem Iso-Buttersäure-Abbau unter diesen Bedingungen. Die Netto-Abbaurrate von Iso-Buttersäure lag um 59 % unter der von Essigsäure (2,5 %/h gegenüber 6,1 %/h).

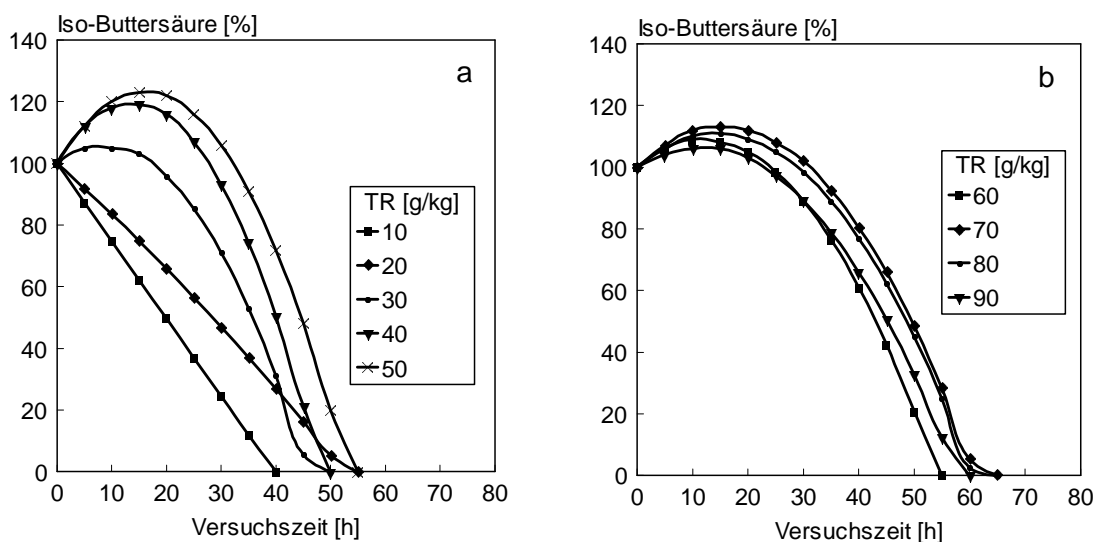


Abb. 4.45 a, b: Errechneter Verlauf der Iso-Buttersäure-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle in Abhängigkeit der TR-Konzentration bei Belüftungsraten von 5 bis 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

Tab. 4.28: Maximale Abbaurrate und Abbaugrad von Iso-Buttersäure bei der Belüftung separierter Schweinegülle in Abhängigkeit der TR-Konzentration

TR [g/kg]	Nettoabbau <sup>1</sup> nach [h]	Maximale Abbaurrate [%/h]	Zeitraum [h]	Abbaugrad ≥ 90 % nach [h]	T <sub>max</sub> [°C]
10	0	2,5	0 – 40	36	38,6
20	0	1,9	0 – 55	48	47,4
30	18	4,4	30 – 45	45	54,5
40	28	4,8	30 – 50	47	59,8
50	33	4,7	35 – 55	52	63,5
60	24	3,9	35 – 55	52	65,4
70	32	4,0	45 – 60	59	65,6
80	29	4,0	45 – 60	59	64,1
90	23	3,4	40 – 60	56	60,9

1: Iso-Buttersäure-Konzentration ≤ 100 %

Der Abbau von n-Buttersäure bei der Belüftung separierter Schweinegülle wurde bei Belüftungsraten von 5 bis 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) untersucht (Abb. 4.46 – 4.48).

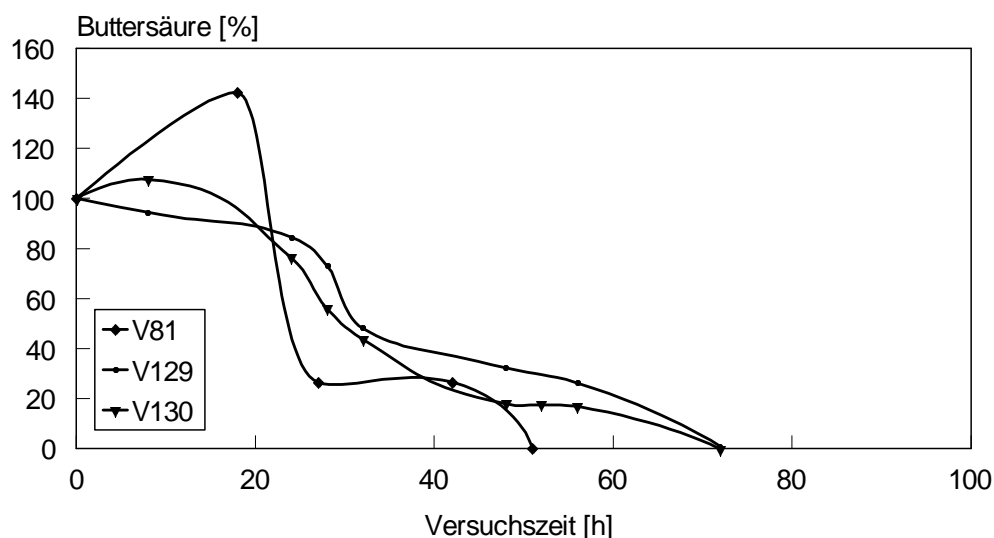


Abb. 4.46: Verlauf der Buttersäure-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

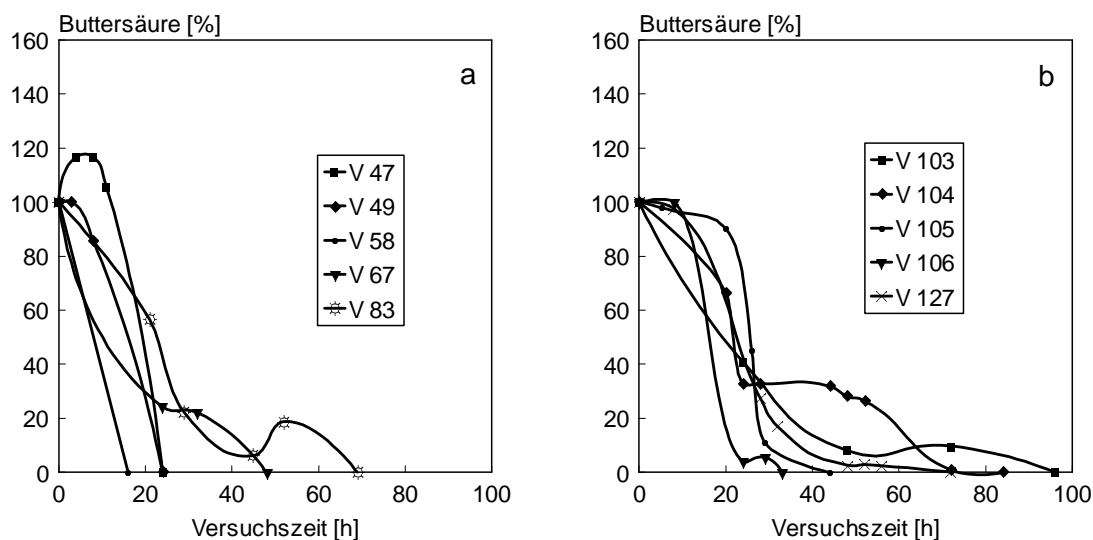


Abb. 4.47 a, b: Verlauf der Buttersäure-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

Bei Belüftungsraten von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) wurden maximale Abbauraten von 5 %/h (V 130) bis 12,8 %/h (V 81) ermittelt. Im Mittel der Versuche betrug die maximale Abbaurate 8,0 %. Der Buttersäure-Abbau war nach 51 h (V 81) bzw. 72 h (V 129, V130) abgeschlossen. Belüftungsraten von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) ergaben maximale Abbauraten von 2,5 %/h (V 103) bis 8,6 %/h (V 105). Im Mittel der Versuche lag die maximale Abbaurate bei 5,6 %/h. Der Zeitbedarf zum vollständigen Buttersäure-Abbau schwankte zwischen 16 h (V 58) und 96 h (V 103). Bei



Belüftungsraten von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  wurden maximale Abbauraten von  $3,7 \text{ \%/h}$  (V 128) bis  $15,6 \text{ \%/h}$  (V 48) festgestellt. Im Mittel der Versuche lag die maximale Abbaurate bei  $5,8 \text{ \%/h}$ .

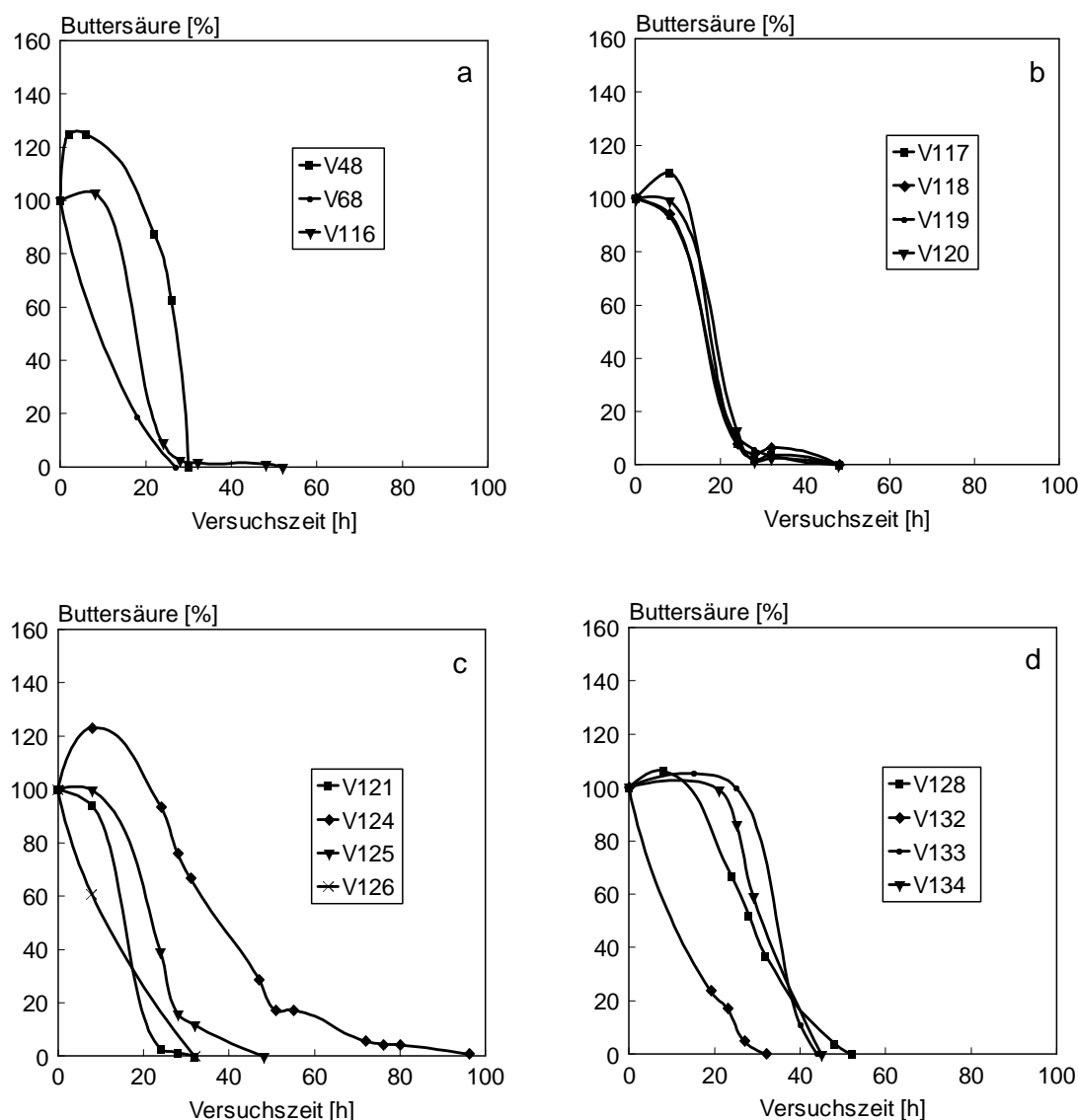


Abb. 4.48 a, b, c, d: Verlauf der Buttersäure-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrates von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

Da die Abbauraten bei konstanter Belüftungsrates erheblich streuten und diese Streuung größer war als die Unterschiede zwischen den Belüftungsrates, ist die Belüftungsrates offensichtlich nicht die entscheidende, die Abbaurates bestimmende EinflussgröÙe. Aufgrund dieser Überlegungen wurde die Auswertung in Abhängigkeit von den TR-Konzentrationen vorgenommen. Hierzu wurden für alle Versuche Kurvenanpassungen errechnet und für vergleichbare TR-Konzentrationen gemittelt (Tab. 4.29). Werden die zu bestimmten Zeitpunkten gemessenen Buttersäure-Konzentrationen gegen die TR-Konzentrationen aufgetragen und wird eine erneute Kurvenanpassung durchgeführt, lässt sich der Einfluss beliebiger TR-Konzentrationen auf die Buttersäure-Konzentration berechnen und graphisch darstellen (Abb. 4.49 a, b).

Der Abbau von Buttersäure setzte in der Mehrzahl der Versuche unmittelbar nach Versuchsbeginn und mit einer hohen Abbaurrate ein. Eine zeitliche Verzögerung des Netto-Abbaus, wie er z. B. bei der Iso-Buttersäure zu beobachten war, trat bei Buttersäure nicht auf.

Tab. 4.29: Reduktion der Buttersäure-Konzentrationen ( $y_{C4}$ ) in Abhängigkeit von der Belüftungszeit (x) und des Trockenrückstandes (TR) bei Belüftungsraten von 5 bis 20  $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$

V-Nr	BLR [ $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ ]	TR [g/kg]	$T_{\max}$ [°C]	Funktionsgleichung	$r^2$
106	10	17,9	46,5	$y_{C4} = -0,021 x^2 - 2,6334 x + 100$	0,91
126	10	14,6	43,8	$y_{C4} = 0,0755 x^2 - 5,5417 x + 100$	1,00
121	20	23,9	53,4	$y_{C4} = -0,0153 x^2 - 2,9764 x + 100$	0,93
Mittel		18,8	47,9	$y_{C4} = 0,013 x^2 - 3,717 x + 100$	
50	5	36,4	54,9	n. b.	0,97
47	10	34,4	56,5	$y_{C4} = -0,381 x^2 + 4,9629 x + 100$	1,00
49	10	39,5	55,3	$y_{C4} = -0,1586 x^2 - 0,3625 x + 100$	1,00
58	10	39,6	52,5	n. b.	-
105	10	36,8	64,1	$y_{C4} = -0,2197 x^3 + 3,4957 x + 100$	0,95
48	20	37,3	49,2	$y_{C4} = -0,3497 x^2 + 7,3043 x + 100$	0,97
53	20	39,8	55,5	n. b.	-
Mittel		37,7	55,4	$y_{C4} = -0,2773 x^2 + 3,85 x + 100$	
81	5	51,4	n.b.	$y_{C4} = -0,0471 x^2 + 0,2833 x + 100$	0,90
83	10	51,8	62,4	$y_{C4} = 0,0226 x^2 - 2,9645 x + 100$	0,95
116	20	46,8	71,0	$y_{C4} = -0,0514 x^2 - 1,836 x + 100$	0,92
132	20	49,3	68,1	$y_{C4} = 0,0634 x^2 - 5,1682 x + 100$	1,00
133	20	47,5	58,0	$y_{C4} = -0,1085 x^2 + 2,3655 x + 100$	0,98
134	20	49,7	59,0	$y_{C4} = -0,079 x^2 + 1,2843 x + 100$	0,97
Mittel		49,4	63,7	$y_{C4} = -0,033 x^2 - 1,006 x + 100$	
129	5	65,2	n.b.	$y_{C4} = -0,0052 x^2 - 1,0331 x + 100$	0,94
130	5	63,9	67,7	$y_{C4} = 0,0014 x^2 - 1,5717 x + 100$	0,98
127	10	63,1	69,7	$y_{C4} = 0,0246 x^2 - 3,1683 x + 100$	0,95
67	10	64,2	55,9	$y_{C4} = 0,0361 x^2 - 3,7867 x + 100$	0,67
68	20	58,5	56,0	$y_{C4} = 0,0897 x^2 - 6,1259 x + 100$	1,00
117	20	63,9	68,4	$y_{C4} = -0,0699 x^2 - 1,3587 x + 100$	0,89
119	20	62,7	67,3	$y_{C4} = -0,0207 x^2 - 2,6523 x + 100$	0,94
128	20	61,5	68,4	$y_{C4} = -0,0171 x^2 - 1,1328 x + 100$	0,96
Mittel		62,9	64,8	$y_{C4} = 0,005 x^2 - 2,604 x + 100$	
103	10	68,4	66,4	$y_{C4} = 0,0174 x^2 - 2,6593 x + 100$	0,97
104	10	72,4	68,6	$y_{C4} = 0,0139 x^2 - 2,3246 x + 100$	0,89
118	20	76,2	68,6	$y_{C4} = -0,0114 x^2 - 2,9195 x + 100$	0,93
125	20	69,9	69,9	$y_{C4} = -0,0792 x^2 - 0,4769 x + 100$	0,97
Mittel		71,7	68,4	$y_{C4} = -0,0156 x^2 - 2,095 x + 100$	
120	20	88,6	63,4	$y_{C4} = -0,0462 x^2 - 1,9527 x + 100$	0,93
124	20	105,7	49,0	$y_{C4} = -0,0024 x^2 - 1,3973 x + 100$	0,87
Mittel		97,3	56,2	$y_{C4} = -0,0243 x^2 - 1,675 x + 100$	

n. b. = nicht bestimmt

Bei TR-Konzentrationen von 10 g/kg, bei denen die Nachversäuerung zu vernachlässigen ist, wurde mit 7,1 %/h die höchste Abbaurate ermittelt. Buttersäure wurde demzufolge noch schneller abgebaut als Essigsäure, wo die maximale Abbaurate unter vergleichbaren Bedingungen 6,1 %/h betrug. Im Vergleich zu Propionsäure und Iso-Buttersäure, bei denen die maximalen Abbauraten bei 2,8 bzw. 2,5 %/h lagen, lag die Buttersäure-Abbaurrate um das 2- bis 3-fache höher. Mit steigenden TR-Konzentrationen ging die maximale Abbaurate zurück und betrug bei TR-Konzentrationen oberhalb von 50 g/kg nur noch 2,4 bis 3,1 %/h (Tab. 4.30).

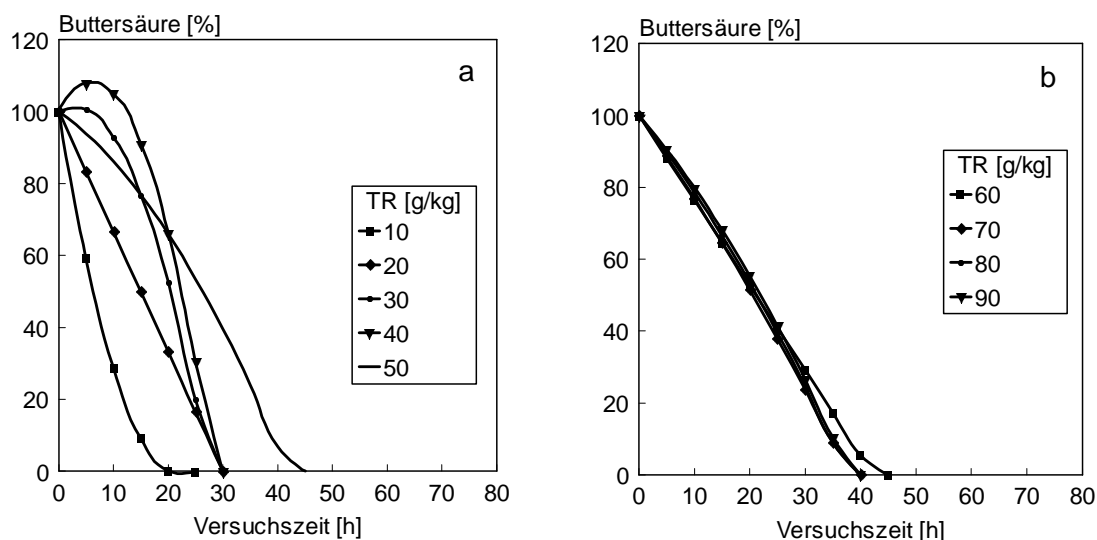


Abb. 4.49 a, b: Errechneter Verlauf der Buttersäure-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle in Abhängigkeit der TR-Konzentration bei Belüftungsraten von 5 bis 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

Tab. 4.30: Maximale Abbaurate und Abbaugrad von Buttersäure bei der Belüftung separierter Schweinegülle in Abhängigkeit der TR-Konzentration

TR [g/kg]	Nettoabbau <sup>1</sup> nach [h]	Maximale Abbaurrate [%/h]	Zeitraum [h]	Abbaugrad ≥ 90 % nach [h]	T <sub>max</sub> [°C]
10	0	7,1	0 – 10	15	38,6
20	0	3,3	0 – 30	27	47,4
30	6	5,3	15 – 30	27	54,5
40	13	6,2	15 – 30	28	59,8
50	0	3,1	25 – 40	39	63,5
60	0	2,4	0 – 40	39	65,4
70	0	2,6	0 – 40	35	65,6
80	0	2,6	0 – 40	35	64,1
90	0	2,6	0 – 40	36	60,9

1: Buttersäure-Konzentration ≤ 100 %

Der Abbau von Iso-Valeriansäure bei der Belüftung separierter Schweinegülle wurde bei Belüftungsraten von 5 bis 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) untersucht (Abb. 4.50 – 4.52).

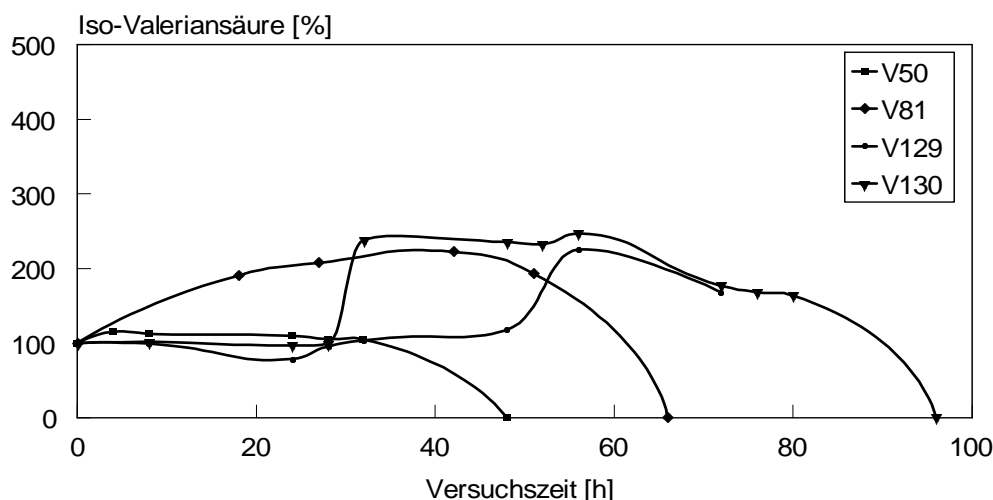


Abb. 4.50: Verlauf der Iso-Valeriansäure-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

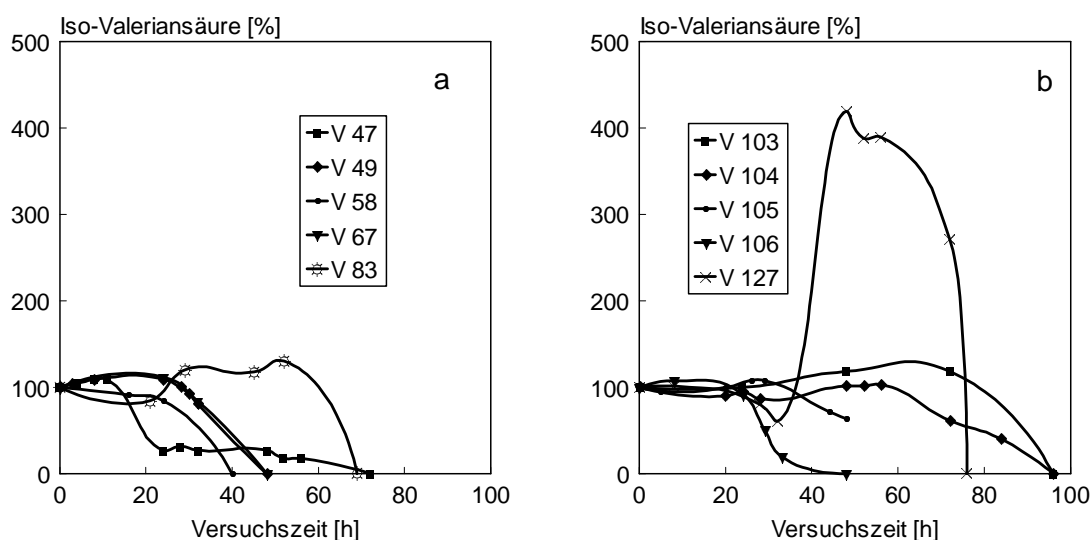


Abb. 4.51 a, b: Verlauf der Iso-Valeriansäure-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

Analog zur Iso-Buttersäure setzte der Iso-Valeriansäure-Abbau gegenüber dem Abbau von Essigsäure oder Buttersäure deutlich zeitverzögert ein. Bei Belüftungsraten von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) wurden maximale Abbauraten von 6,6 %/h (V 50) bis 12,9 %/h (V 81) ermittelt. Im Mittel der Versuche lag die maximale Abbaurate bei 9,9 %/h. Der Abbau von Iso-Valeriansäure war nach 48 h (V 50) bzw. 96 h (V 130) abgeschlossen. Bei Belüftungsraten von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) wurden maximale Abbauraten von 2,3 %/h (V 104) bis 15,7 %/h (V 127) gemessen. Im Mittel aller Versuche lag sie bei 6,3 %/h. Der Iso-Valeriansäure-Abbau war nach 40 h (V 58) bzw.

96 h (V 103, V 104) beendet. Belüftungsraten von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  führten zu maximalen Abbauraten von  $3,7 \text{ \%/h}$  (V 119) bis  $31,6 \text{ \%/h}$  (V 125). Im Mittel betrug die maximale Abbaurate  $9,5 \text{ \%/h}$ . Aufgrund der Tatsache, dass die Ergebnisse bei einer konstanten Belüftungsrates stark streuten und die gemittelte, maximale Abbaurate keinen Zusammenhang mit der Belüftungsrates erkennen ließ, wurde die Auswertung unabhängig von der Belüftungsrates vorgenommen. Hierzu wurden für alle Versuche Kurvenanpassungen errechnet und für vergleichbare TR-Konzentrationen gemittelt (Tab. 4.31). Werden die zu bestimmten Zeitpunkten gemessenen Iso-Valeriansäure-Konzentrationen gegen die TR-Konzentrationen aufgetragen und wird eine erneute Kurvenanpassung durchgeführt, lässt sich der Einfluss beliebiger TR-Konzentrationen auf die Iso-Valeriansäure-Konzentration berechnen und graphisch darstellen (Abb. 4.53 a, b).

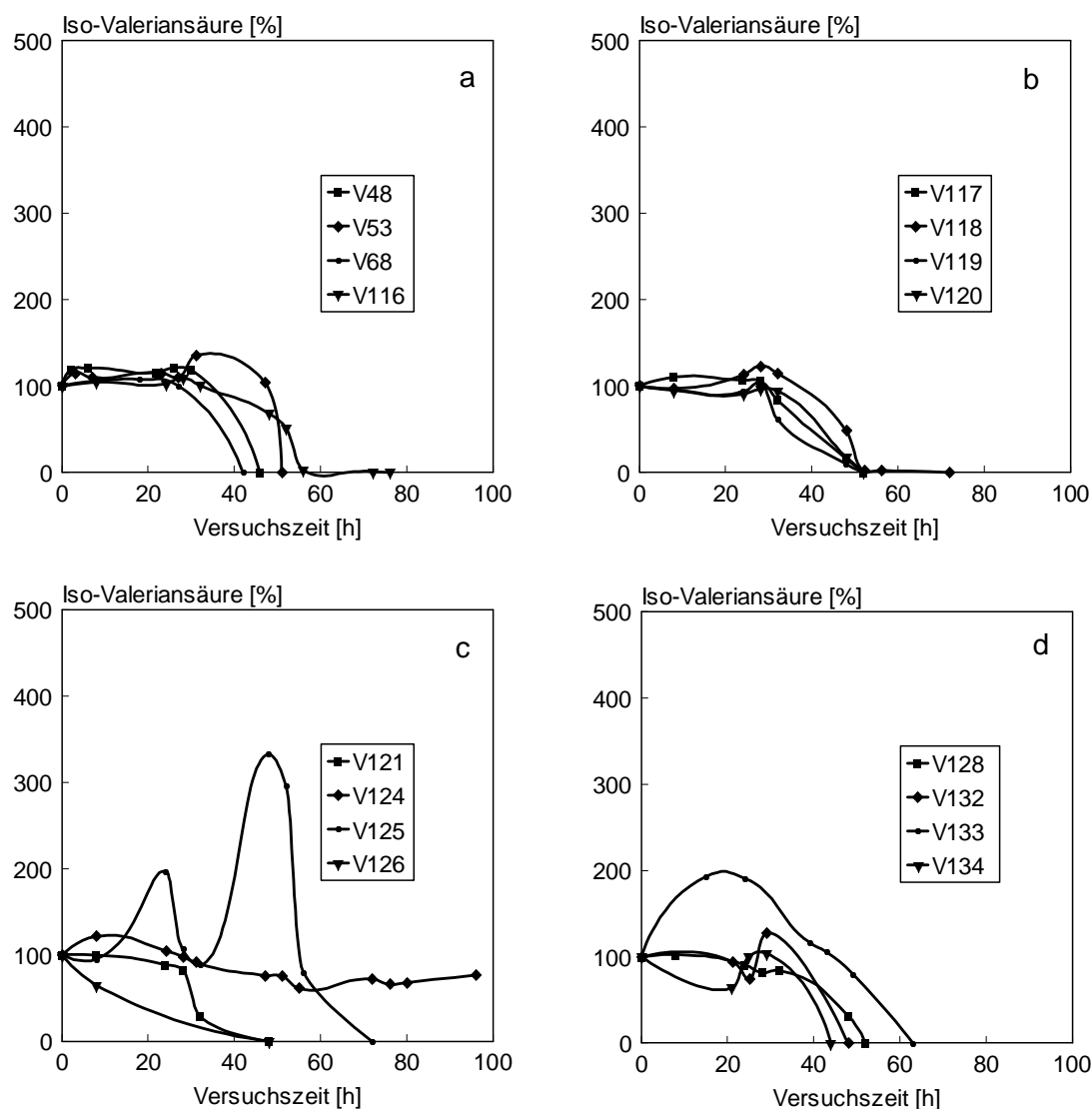


Abb. 4.52 a, b, c, d: Verlauf der Iso-Valeriansäure-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrates von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

Der Netto-Abbau von Iso-Valeriansäure setzte mit steigenden TR-Konzentrationen zeitlich verzögert ein und wurde dementsprechend auch später abgeschlossen. Ein sofortiger Abbau wurde nur bei geringen TR-Konzentrationen beobachtet, während bei TR-Konzentrationen

über 40 g/kg ein Netto-Abbau erst nach 26 – 41 h festzustellen war. Die maximalen Abbauraten lagen zwischen 3,7 %/h und 5,2 %/h. Weitgehend abgeschlossen war der Abbau von Iso-Valeriansäure nach 25 h (TR= 10 g/kg) bis 68 h (TR= 80 g/kg). Werden Güllen mit TR-Konzentrationen von 10 g/kg verglichen, wurde Iso-Valeriansäure mit 3,7 %/h deutlich langsamer oxidiert als Essigsäure (6,1 %/h) und Buttersäure (7,1 %/h). Die maximale Abbaurate lag jedoch erheblich über der von Propionsäure (2,8 %/h) und Iso-Buttersäure (2,5 %/h).

Tab. 4.31: Reduktion der Iso-Valeriansäure-Konzentrationen ( $y_{IC5}$ ) in Abhängigkeit von der Belüftungszeit (x) und des Trockenrückstandes (TR) bei Belüftungsraten von 5 bis 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

V-Nr	BLR [m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·h)]	TR [g/kg]	T <sub>max</sub> [°C]	Funktionsgleichung	r <sup>2</sup>
106	10	17,9	46,5	$y_{IC5} = -0,043 x^2 - 0,207 x + 100$	0,86
126	10	14,6	43,8	$y_{IC5} = 0,0567 x^2 - 4,8032 x + 100$	1,00
121	20	23,9	53,4	$y_{IC5} = -0,1437 x^2 + 2,8165 x + 100$	0,81
Mittel		18,8	47,9	$y_{IC5} = -0,043 x^2 - 0,731 x + 100$	
50	5	36,4	54,9	$y_{IC5} = -0,1124 x^2 + 3,3791 x + 100$	0,97
47	10	34,4	56,5	$y_{IC5} = 0,0143 x^2 - 2,372 x + 100$	0,84
49	10	39,5	55,3	$y_{IC5} = -0,0988 x^2 + 2,6703 x + 100$	0,99
58	10	39,6	52,5	$y_{IC5} = -0,098 x^2 + 1,454 x + 100$	0,99
105	10	36,8	64,1	$y_{IC5} = -0,04 x^3 + 1,1785 x + 100$	0,88
48	20	37,3	49,2	$y_{IC5} = -0,144 x^2 + 4,5236 x + 100$	0,96
53	20	39,8	55,5	$y_{IC5} = -0,0877 x^2 + 3,2636 x + 100$	0,63
Mittel		37,7	55,4	$y_{IC5} = -0,081 x^2 + 2,014 x + 100$	
81	5	51,4	n.b.	$y_{IC5} = -0,1546 x^2 + 9,024 x + 100$	0,92
83	10	51,8	62,4	$y_{IC5} = -0,0505 x^2 + 2,3922 x + 100$	0,61
116	20	46,8	71,0	$y_{IC5} = -0,059 x^2 + 1,9037 x + 100$	0,92
132	20	49,3	68,1	$y_{IC5} = -0,0848 x^2 + 2,0889 x + 100$	0,76
133	20	47,5	58,0	$y_{IC5} = -0,1218 x^2 + 5,7836 x + 100$	0,89
134	20	49,7	59,0	$y_{IC5} = -0,0888 x^2 + 1,7979 x + 100$	0,74
Mittel		49,4	63,7	$y_{IC5} = -0,093 x^2 + 3,832 x + 100$	
130	5	63,9	67,7	n. b.	
127	10	63,1	69,7	n. b.	
67	10	64,2	55,9	$y_{IC5} = -0,1049 x^2 + 2,9418 x + 100$	1,00
68	20	58,5	56,0	$y_{IC5} = -0,1339 x^2 + 3,2915 x + 100$	0,98
117	20	63,9	68,4	$y_{IC5} = -0,0815 x^2 + 2,2489 x + 100$	0,99
119	20	62,7	67,3	$y_{IC5} = -0,0614 x^2 + 1,1837 x + 100$	0,94
128	20	61,5	68,4	$y_{IC5} = -0,0543 x^2 + 1,0297 x + 100$	0,98
Mittel		62,9	64,8	$y_{IC5} = -0,0872 x^2 + 2,139 x + 100$	
103	10	68,4	66,4	$y_{IC5} = -0,0281 x^2 + 1,8177 x + 100$	0,79
104	10	72,4	68,6	$y_{IC5} = -0,0172 x^2 + 0,7067 x + 100$	0,87
118	20	76,2	68,6	$y_{IC5} = -0,0847 x^2 + 2,867 x + 100$	0,94
125	20	69,9	69,9	n. b.	
Mittel		71,7	68,4	$y_{IC5} = -0,0433 x^2 + 1,797 x + 100$	
120	20	88,6	63,4	$y_{IC5} = -0,0666 x^2 + 1,559 x + 100$	0,96
124	20	105,7	49,0	$y_{IC5} = 0,0009 x^2 - 0,4492 x + 100$	0,62
Mittel		97,3	56,2	$y_{IC5} = -0,0329 x^2 + 0,555 x + 100$	

n. b. = nicht bestimmt

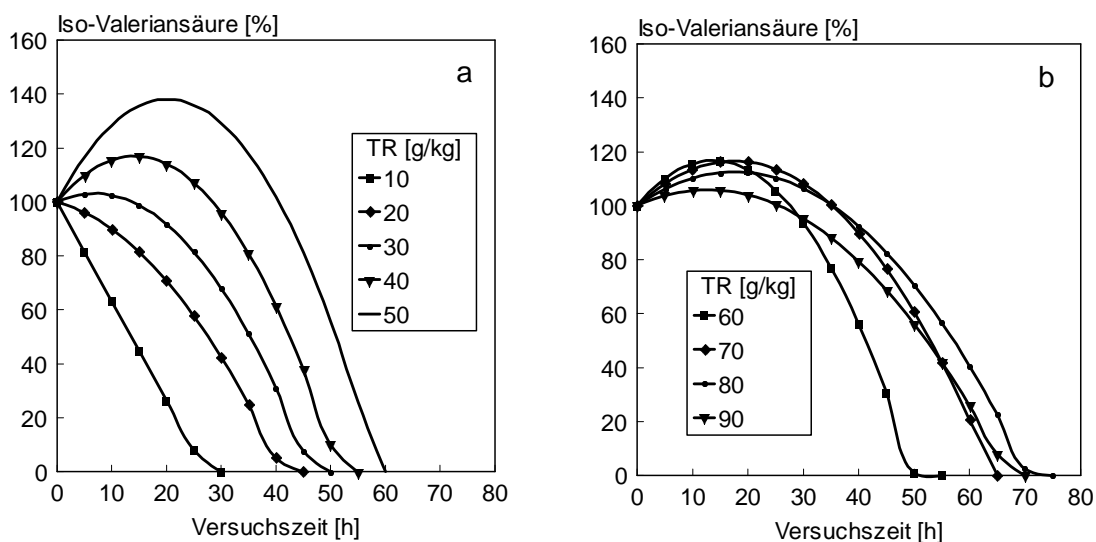


Abb. 4.53 a, b: Errechneter Verlauf der Iso-Valeriansäure-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle in Abhängigkeit der TR-Konzentration bei Belüftungsraten von 5 bis 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

Tab. 4.32: Maximale Abbaurrate und Abbaugrad von Iso-Valeriansäure bei der Belüftung separierter Schweinegülle in Abhängigkeit der TR-Konzentration

TR [g/kg]	Nettoabbau <sup>1</sup> nach [h]	Maximale Abbaurrate [%/h]	Zeitraum [h]	Abbaugrad ≥ 90 % nach [h]	T <sub>max</sub> [°C]
10	0	3,7	0 – 25	25	38,6
20	0	3,5	25 – 40	39	47,4
30	14	4,0	30 – 45	45	54,5
40	29	4,7	35 – 50	50	59,8
50	41	5,2	40 – 60	58	63,5
60	28	5,1	35 – 50	49	65,4
70	36	3,9	45 – 65	63	65,6
80	36	3,6	55 – 70	68	64,1
90	26	3,0	45 – 65	65	60,9

1: Iso-Valeriansäure-Konzentration ≤ 100 %

Der Abbau von N-Valeriansäure bei der Belüftung separierter Schweinegülle wurde bei Belüftungsraten von 5 bis 20  $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  untersucht (Abb. 4.54 – 4.56).

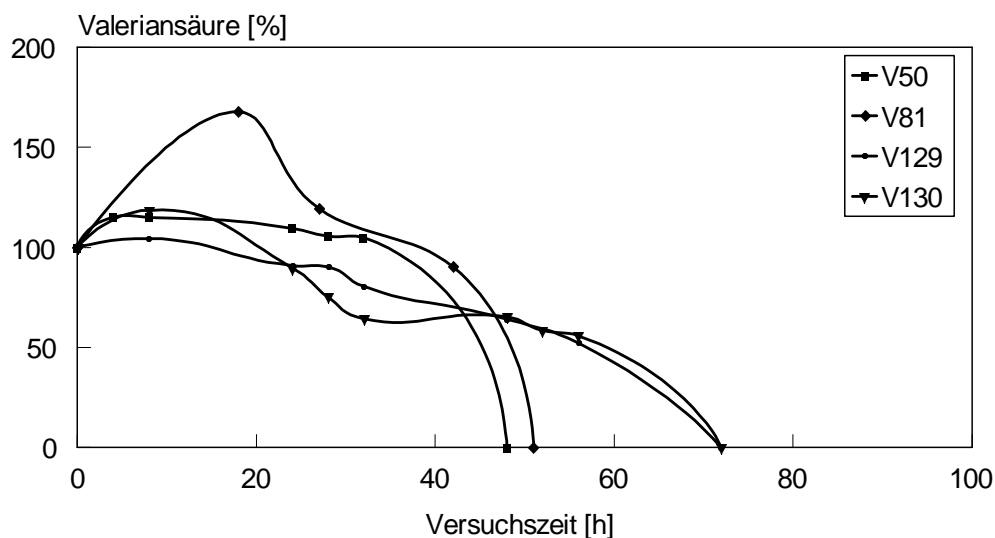


Abb. 4.54: Verlauf der Valeriansäure-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 5  $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

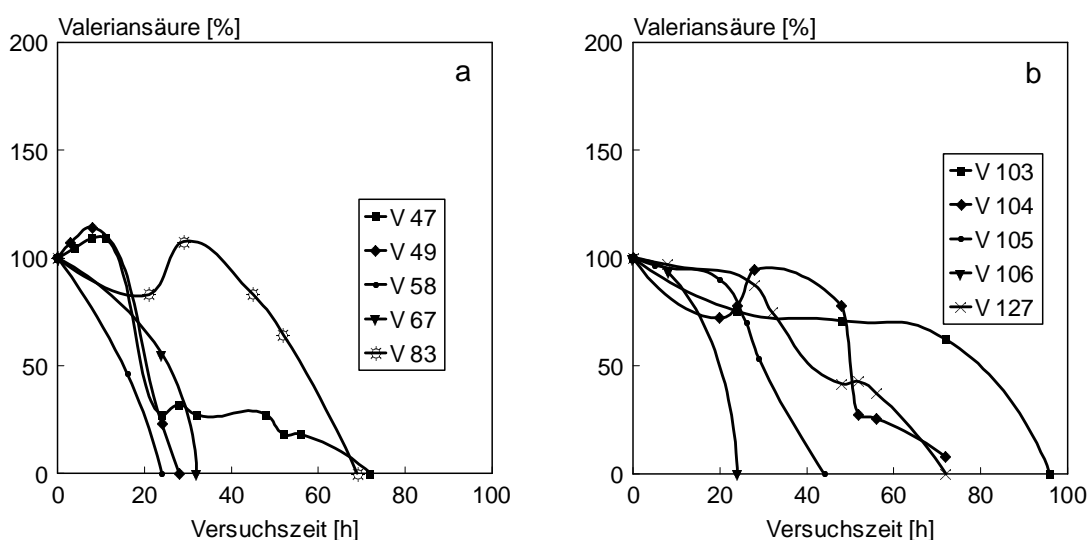


Abb. 4.55 a, b: Verlauf der Valeriansäure-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 10  $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

Bei Belüftungsraten von 5  $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  wurden maximale Abbauraten von 3,3 %/h (V 129) bis 10,0 %/h (V 81) ermittelt, im Mittel der Versuche lag sie bei 5,9 %/h. Der Abbau dieser Säure war nach 48 h (V 50) bis 72 h (V 129, V130) abgeschlossen. Belüftungsraten von 10  $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  ergaben maximale Abbauraten von 1,9 %/h (V 127) bis 12,6 %/h (V 104). Im Mittel der Versuche lag sie bei 5,5 %/h. Valeriansäure war unter diesen Bedingungen nach 28 h (V 49) bis 96 h (V 103, V 104) vollständig oxidiert worden. Belüftungsraten von 20  $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  führten



zu maximalen Abbauraten von 2,2 %/h (V 120) bis zu 14,7 %/h (V 128). Im Mittel aller Versuche mit dieser Belüftungsrate lag die maximale Abbaurrate bei 6,1 %/h. Somit ist auch bei dem Abbau dieser Säure kein deutlicher Einfluss der Belüftungsrate erkennbar.

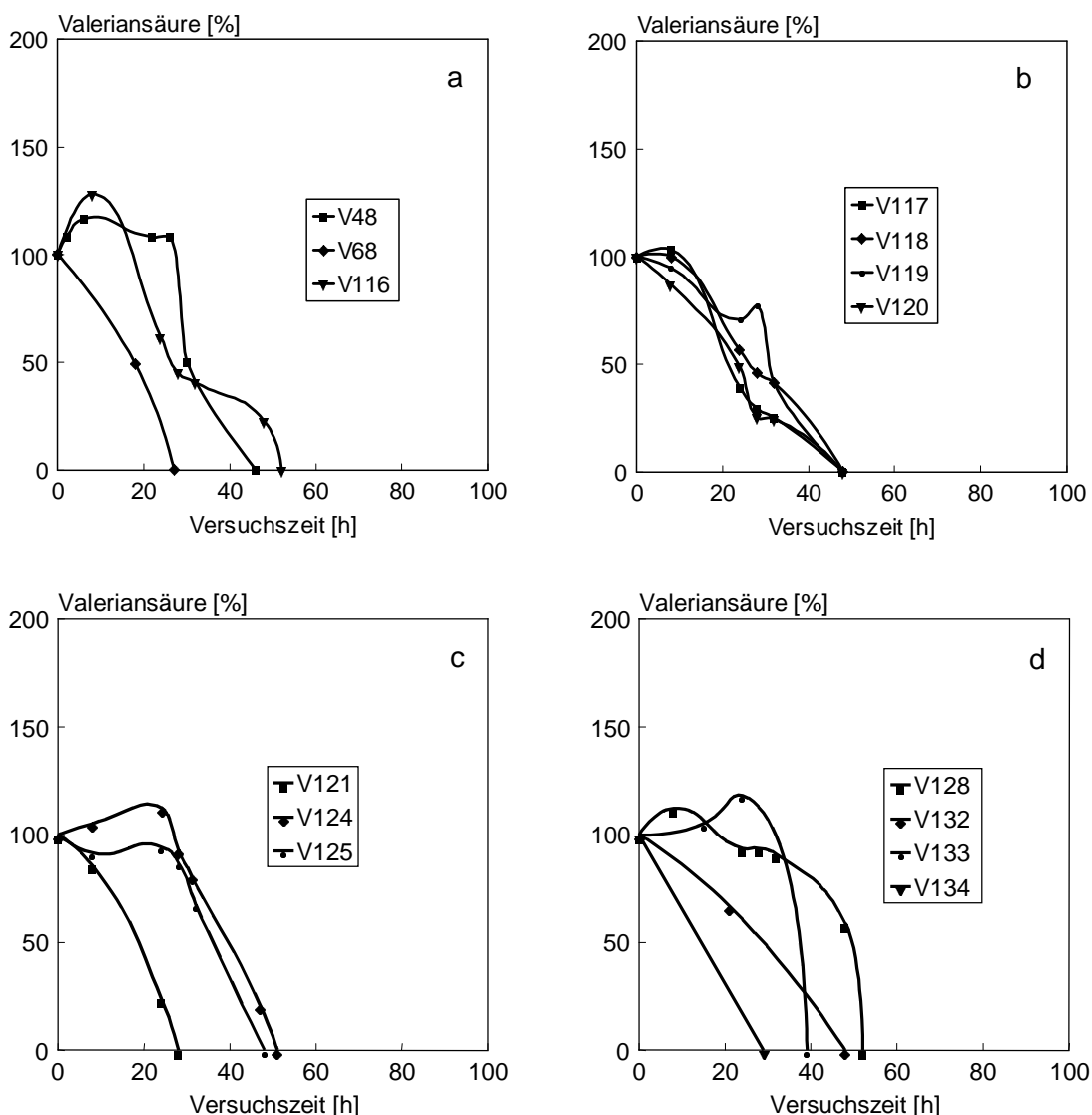


Abb. 4.56 a, b, c, d: Verlauf der Valeriansäure-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde die Auswertung in Abhängigkeit der TR-Konzentrationen durchgeführt. Hierzu wurden für alle Versuche Kurvenanpassungen errechnet und für vergleichbare TR-Konzentrationen gemittelt (Tab. 4.33). Werden die zu bestimmten Zeitpunkten gemessenen Valeriansäure-Konzentrationen gegen die TR-Konzentrationen aufgetragen und wird eine erneute Kurvenanpassung durchgeführt, lässt sich der Einfluss beliebiger TR-Konzentrationen auf die Valeriansäure-Konzentration berechnen und graphisch darstellen (Abb. 4.57 a, b). In der Mehrzahl der Versuche setzte der Valeriansäure-Abbau mit Beginn der Belüftung ein. Die maximalen Abbauraten sanken von 6,3 %/h (TR= 10 g/kg) auf 2,8 %/h (TR= 90 g/kg). Im Vergleich zu den anderen organischen Säuren lag die maximale Abbaurrate bei TR-Konzentrationen von 10 g/kg, bei der die

Nachversäuerung aus Feststoffen vernachlässigt werden kann, mit 6,3 %/h deutlich über der von Propionsäure (2,8 %/h), Iso-Buttersäure (2,5 %/h) und Iso-Valeriansäure (3,7 %/h). Höhere Abbauraten wurden nur für Buttersäure (7,1 %/h) und vergleichbare für Essigsäure (6,1 %/h) errechnet.

Tab. 4.33: Reduktion der Valeriansäure-Konzentrationen ( $y_{CS}$ ) in Abhängigkeit von der Belüftungszeit (x) und des Trockenrückstandes (TR) bei Belüftungsraten von 5 bis 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

V-Nr	BLR [m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·h)]	TR [g/kg]	T <sub>max</sub> [°C]	Funktionsgleichung	r <sup>2</sup>
106	10	17,9	46,5	$y_{CS} = -0,2112 x^2 + 0,9021 x + 100$	1,00
126	10		43,8	n. b.	
121	20	23,9	53,4	$y_{CS} = -0,0905 x^2 - 1,0244 x + 100$	1,00
Mittel		20,9	47,9	$y_{CS} = -0,151 x^2 - 0,0612 x + 100$	
50	5	36,4	54,9	$y_{CS} = -0,1136 x^2 + 3,4252 x + 100$	0,98
47	10	34,4	56,5	$y_{CS} = 0,0143 x^2 - 2,372 x + 100$	0,84
49	10	39,5	55,3	$y_{CS} = -0,2447 x^2 + 3,0513 x + 100$	0,96
58	10	39,6	52,5	$y_{CS} = -0,1005 x^2 - 1,7542 x + 100$	1,00
105	10	36,8	64,1	$y_{CS} = -0,0614 x^3 + 0,4009 x + 100$	0,99
48	20	37,3	49,2	$y_{CS} = -0,0992 x^2 + 2,2686 x + 100$	0,89
53	20		55,5	n. b.	
Mittel		37,4	55,4	$y_{CS} = -0,101 x^2 + 0,837 x + 100$	
81	5	51,4	n.b.	$y_{CS} = -0,1431 x^2 + 5,439 x + 100$	0,93
83	10	51,8	62,4	$y_{CS} = -0,0338 x^2 + 0,9649 x + 100$	0,91
116	20	46,8	71,0	$y_{CS} = -0,0143 x^2 - 1,1355 x + 100$	0,85
132	20		68,1	n. b.	
133	20		58,0	n. b.	
134	20		59,0	n. b.	
Mittel		50,0	63,7	$y_{CS} = -0,064 x^2 + 1,756 x + 100$	
129	5	65,2	n. b.	$y_{CS} = -0,0226 x^2 + 0,2903 x + 100$	0,99
130	5	63,9	67,7	$y_{CS} = -0,0174 x^2 - 0,0192 x + 100$	0,88
127	10	63,1	69,7	$y_{CS} = -0,016 x^2 - 0,2601 x + 100$	0,98
67	10	64,2	55,9	$y_{CS} = -0,1588 x^2 + 1,955 x + 100$	1,00
68	20	58,5	56,0	$y_{CS} = -0,0967 x^2 - 1,0926 x + 100$	1,00
117	20	63,9	68,4	$y_{CS} = 0,0071 x^2 - 2,4983 x + 100$	0,93
119	20	62,7	67,3	$y_{CS} = -0,0401 x^2 - 0,1869 x + 100$	0,95
128	20	61,5	68,4	$y_{CS} = -0,06 x^2 + 1,5458 x + 100$	0,89
Mittel		62,9	64,8	$y_{CS} = -0,0506 x^2 - 0,033 x + 100$	
103	10	68,4	66,4	$y_{CS} = -0,0079 x^2 - 0,1941 x + 100$	0,89
104	10	72,4	68,6	$y_{CS} = -0,013 x^2 - 0,391 x + 100$	0,81
118	20	76,2	68,6	$y_{CS} = -0,017 x^2 - 1,3028 x + 100$	0,98
125	20	69,9	69,9	$y_{CS} = -0,0686 x^2 + 1,2444 x + 100$	0,96
Mittel		71,7	68,4	$y_{CS} = -0,0266 x^2 - 0,161 x + 100$	
120	20	88,6	63,4	$y_{CS} = 0,0111 x^2 - 2,6583 x + 100$	0,98
124	20	105,7	49,0	$y_{CS} = -0,0775 x^2 + 1,97 x + 100$	0,99
Mittel		97,3	56,2	$y_{CS} = -0,0332 x^2 - 0,344 x + 100$	

n. b. = nicht bestimmt

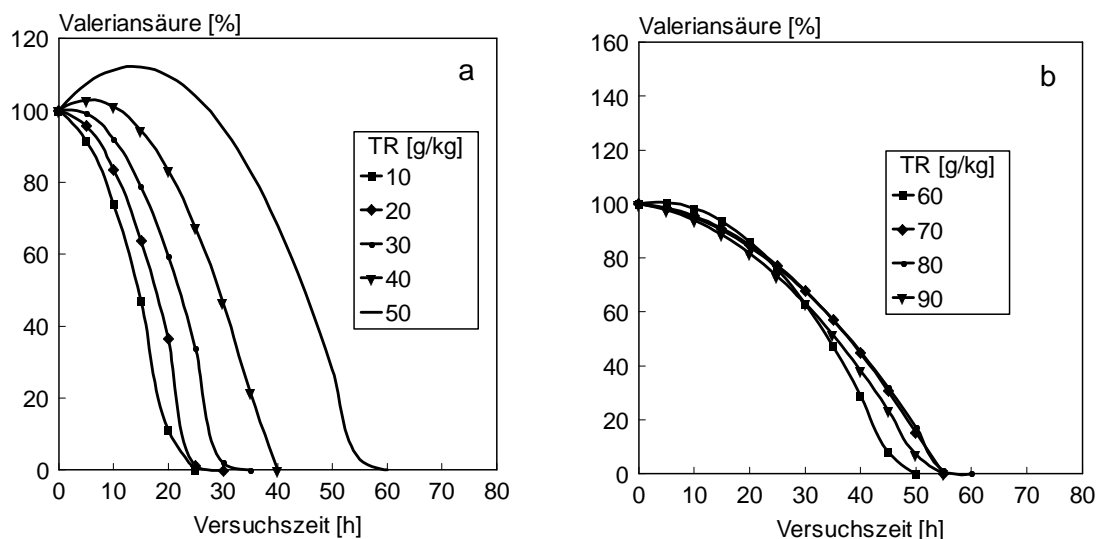


Abb. 4.57a, b: Errechneter Verlauf der Valeriansäure-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle in Abhängigkeit der TR-Konzentration bei Belüftungsraten von 5 bis 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

Tab. 4.34: Maximale Abbaurrate und Abbaugrad von Valeriansäure bei der Belüftung separierter Schweinegülle in Abhängigkeit der TR-Konzentration

TR [g/kg]	Nettoabbau <sup>1</sup> nach [h]	Maximale Abbaurrate [%/h]	Zeitraum [h]	Abbaugrad ≥ 90 % nach [h]	T <sub>max</sub> [°C]
10	0	6,3	10 – 20	21	38,6
20	0	6,3	15 – 25	24	47,4
30	3	5,7	20 – 30	29	54,5
40	11	4,5	25 – 40	37	59,8
50	28	4,3	40 – 55	54	63,5
60	7	3,7	30 – 45	45	65,4
70	0	2,9	35 – 55	52	65,6
80	0	2,9	40 – 55	53	64,1
90	0	2,8	30 – 50	50	60,9

1: Valeriansäure-Konzentration ≤ 100 %

Ein Vergleich der maximalen Abbauraten bei TR-Konzentrationen von 10 g/kg, bei denen die Nachversäuerung aus organischen Feststoffen vernachlässigt werden kann, zeigt, dass Buttersäure mit 7,1 %/h mit der höchsten Abbaurrate oxidiert wurde (Abb. 4.58 a, Tab. 4.30). Die zweithöchste Abbaurrate wurde mit 6,3 %/h, allerdings mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung, bei Valeriansäure ermittelt, gefolgt von Essigsäure, bei der eine Abbaurrate von 6,1 %/h festgestellt wurde. Der Abbau der anderen organischen Säuren verlief deutlich langsamer (Iso-Valeriansäure: 3,7 %/h, Propionsäure: 2,8 %/h, Iso-Buttersäure: 2,5 %/h). Demnach wurden unverzweigte, länger-kettige Säuren schneller abgebaut als unverzweigte, kurz-kettige. Bei unverzweigten Säuren wurden geradzahlige Säuren schneller oxidiert als ungeradzahlige. Dies gilt offensichtlich jedoch nur für Säuren geringer Kettenlänge. Iso-Verbindungen wurden deutlich langsamer oxidiert als n-Verbindungen gleicher Molmasse (n-

Valeriansäure/Iso-Valeriansäure, n-Buttersäure/Iso-Buttersäure). Mit steigenden TR-Konzentrationen nahmen die mittleren Konzentrationen an organischen Säuren in der Gülle tendenziell zu (Tab. 4.35). Dieser Zusammenhang ist besonders deutlich für Essigsäure, während er bei Valeriansäure kaum noch erkennbar ist. Mit steigenden TR-Konzentrationen nimmt ferner der Anteil an organischen Feststoffen, die im Zuge der Heißfermentation versäuert werden können, ebenfalls zu. Wird nun angenommen, dass der Abbau von organischen Säuren auch bei steigenden TR-Konzentrationen mit einer maximalen Abbaurate erfolgt, wie sie für TR-Konzentrationen von 10 g/kg ermittelt wurde, müssen die bei höheren TR-Konzentrationen festgestellten geringeren Abbauraten auf eine Nachlieferung organischer Säuren aus der Hydrolyse und Versäuerung von Feststoffen zurückzuführen sein. Dementsprechend wurden beispielsweise bei Essigsäure mit steigenden TR-Konzentrationen sinkende maximale Abbauraten ermittelt. Außerdem wurde die maximale Abbaurate mit steigenden TR-Konzentrationen immer später erreicht (Abb. 4.58).

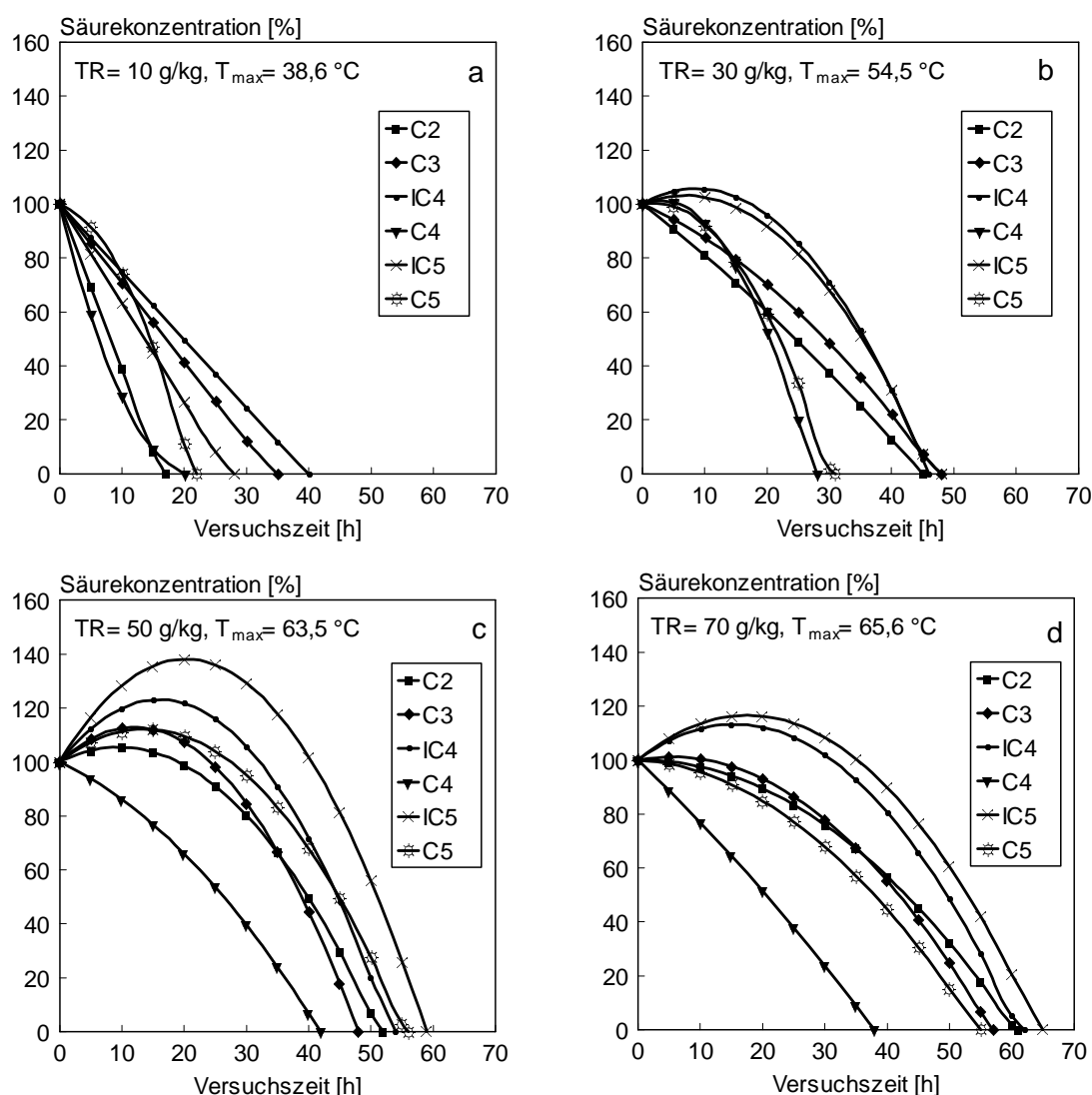


Abb. 4.58 a, b, c, d: Zeitlicher Verlauf der Konzentration organischer Säuren bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit unterschiedlichen TR-Konzentrationen (C2: Essigsäure, C3: Propionsäure, IC4: Iso-Buttersäure, C4: Buttersäure, IC5: Valeriansäure, C5: Valeriansäure)

Ausgehend von der Überlegung, dass sich bei steigenden TR-Konzentrationen die ermittelte maximale Abbaurate aus einer maximalen Abbaurate und einer Nachlieferung aus der Hydrolyse und Versäuerung von organischen Feststoffen ergibt, kann die theoretische Essigsäure-Bildung bei unterschiedlichen TR-Konzentrationen berechnet werden. Sie ergibt sich aus der Differenz der Essigsäure-Konzentration des betrachteten Versuchsverlaufes und der, die sich bei einer maximalen Abbaurate zeitgleich einstellen würde, zuzüglich der Startkonzentration. Bei Betrachtung des Essigsäure-Verlaufs bei einer TR-Konzentration von 50 g/kg wurde nach 10 h Belüftungszeit eine Konzentration von 105,4 % ermittelt (Abb. 4.58 c). Ohne Nachversäuerung würde die Essigsäure-Konzentration bei einer maximalen Abaurate von 6,1 %/h zu diesem Zeitpunkt nur noch 38,9 % betragen. Durch Differenzbildung und Addition der Startkonzentration würde ohne einen Essigsäure-Abbau die Essigsäure-Konzentration zu diesem Zeitpunkt 166,5 % betragen (Abb. 4.59).

Tab. 4.35: Funktionaler Zusammenhang zwischen der TR-Konzentration und mittlerer Konzentration flüchtiger organischer Säuren ( $y_{FOS}$ ) in separierter Schweinegülle, Angaben in [g/kg]

	TR-Konzentration						Funktionaler Zusammenhang	$r^2$
	16,3	37,5	49,9	62,9	71,7	97,2		
Essigsäure	2,1	3,3	3,9	7,7	7,9	11,3	$y_{FOS} = 0,1099 * TR$	0,95
Propionsäure	0,7	2,3	1,9	3,2	2,4	3,4	$y_{FOS} = 0,0396 * TR$	0,83
Iso-Buttersäure	0,2	0,4	0,5	0,9	0,6	0,9	$y_{FOS} = 0,0100 * TR$	0,85
Buttersäure	0,3	0,2	0,6	1,3	1,3	1,5	$y_{FOS} = 0,0159 * TR$	0,86
Iso-Valeriansäure	0,1	0,4	0,2	0,6	0,6	1,1	$y_{FOS} = 0,0092 * TR$	0,85
Valeriansäure	0,01	0,12	0,03	0,13	0,12	0,12	$y_{FOS} = 0,0015 * TR$	0,58

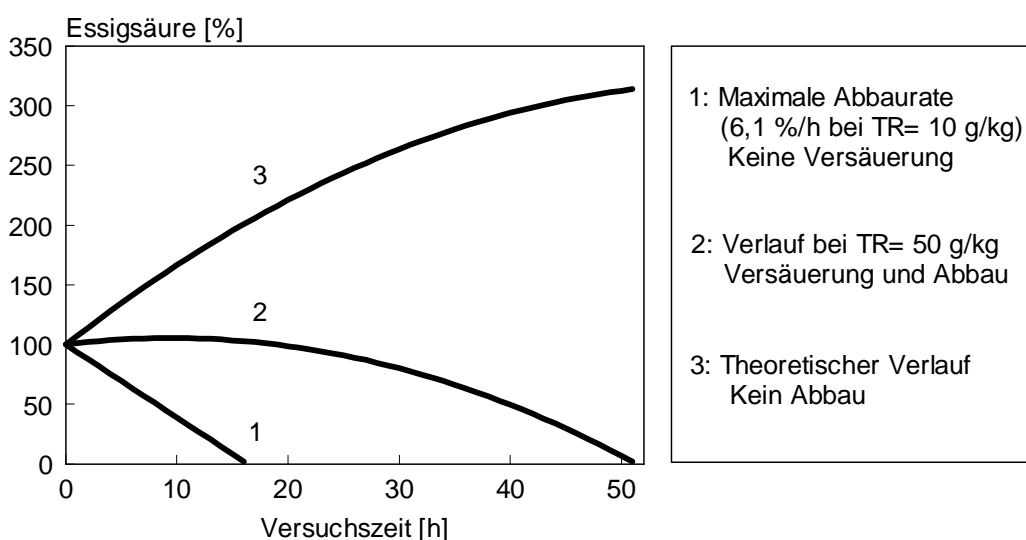


Abb. 4.59: Einfluss der Versäuerung von Feststoffen auf den Verlauf der Essigsäure-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer TR-Konzentration von 50 g/kg

Durch Wiederholung dieser Berechnungen für unterschiedliche TR-Konzentrationen und verschiedene organische Säuren lässt sich der Umfang der Nachversäuerung aus Feststoffen bei der Belüftung separierter Schweinegülle berechnen (Tab. 4.36). Auf der Grundlage dieser Berechnungen ergibt sich, dass im Zuge der aerob-thermophilen Belüftung ein erheblicher Anteil der organischen Feststoffe zu Essigsäure und Buttersäure versäuert werden, wobei mit steigender TR-Konzentration der Anteil der durch die Versäuerung gebildeten Säuren erwartungsgemäß zunimmt. In geringerem Umfang gilt dies auch für die anderen organischen Säuren. Beispielsweise würden bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer TR-Konzentration von 50 g/kg, die durchschnittlich etwa 5,5 g/kg Essigsäure enthält ohne einen Essigsäure-Abbau innerhalb von 51 h weitere 11,8 g/kg Essigsäure gebildet werden. Während die Essigsäure- und Buttersäurebildung offensichtlich bis zum vollständigen Abbau anhält, ist die Nachlieferung der anderen Säuren aus der Versäuerung deutlich früher beendet.

Tab. 4.36: Einfluss der TR-Konzentration auf die Konzentration organischer Säuren und deren Nachbildung aus der Versäuerung von Feststoffen bei der Belüftung separierter Schweinegülle

TR [g/kg]	Parameter	C2	C3	IC4	C4	IC5
10	Konzentration [g/kg]	1,10	0,40	0,10	0,16	0,09
	Versäuerung [h]	-	-	-	-	-
	Versäuerung [%]	-	-	-	-	-
	100 % Abbau [h]	16	37	40	14	16
20	Konzentration [g/kg]	2,20	0,79	0,20	0,32	0,18
	Versäuerung [h]	0 - 38	0 – 23	0 – 52	0 – 29	0 – 35
	Versäuerung [%]	233	115	132	216	153
	100 % Abbau [h]	38	37	52	29	41
30	Konzentration [g/kg]	3,3	1,19	0,30	0,48	0,28
	Versäuerung [h]	0 - 45	0 – 41	0 – 25	0 – 25	0 – 35
	Versäuerung [%]	274	139	148	203	180
	100 % Abbau [h]	45	47	46	28	47
40	Konzentration [g/kg]	4,4	1,58	0,40	0,64	0,37
	Versäuerung [h]	0 - 49	0 – 34	0 – 27	0 – 22	0 – 36
	Versäuerung [%]	297	156	170	215	210
	100 % Abbau [h]	49	49	48	28	52
50	Konzentration [g/kg]	5,5	1,98	0,50	0,80	0,46
	Versäuerung [h]	0 - 51	0 – 29	0 – 30	0 – 41	0 – 40
	Versäuerung [%]	314	173	181	304	249
	100 % Abbau [h]	51	47	53	41	59

C2: Essigsäure, C3: Propionsäure, IC4: Iso-Buttersäure, C4: Buttersäure, IC5: Iso-Valeriansäure

Die Erhöhung der TR-Konzentration um jeweils 10 g/kg führte bei Essigsäure zu einer deutlichen Erhöhung der Säurebildung. Während bei einer TR-Konzentration von 20 g/kg im Zuge der aerob-thermophilen Belüftung die Essigsäure-Konzentration ohne oxidativen Abbau um 233 % ansteigen würde (von durchschnittlich 2,2 g/kg auf 5,13 g/kg), wären es bei einer TR-Konzentration von 30 g/kg 274 % (von durchschnittlich 3,3 g/kg auf 9,04 g/kg).

Dementsprechend führt die Erhöhung der TR-Konzentration um 10 g/kg zu einer Mehrbildung an Essigsäure von 3,91 g/kg. Unter Berücksichtigung der hierfür erforderlichen Versuchszeit (45 h) kann die Versäuerungsgeschwindigkeit berechnet werden. Sie lag in diesem Fall bei 8,7 g/(kg TR·h). In analoger Weise lassen sich die Versäuerungsgeschwindigkeiten für steigende TR-Konzentrationen und für die anderen Säuren berechnen. Bei Essigsäure nahm auf der Grundlage dieser Berechnungen die Säurebildung mit steigenden TR-Konzentrationen geringfügig ab (von 8,7 über 8,2 bis auf 8 g/(kg TR·h)). Bei Propionsäure wurden deutlich geringere Versäuerungsgeschwindigkeiten errechnet, die allerdings mit steigenden TR-Konzentrationen zunahm (von 1,8 über 2,4 auf 3,3 g/(kg TR·h)). Die Geschwindigkeit der Iso-Buttersäurebildung lag zwischen 0,7 und 0,9 g/(kg TR·h). Buttersäure wurde mit steigenden TR-Konzentrationen mit einer zunehmenden Geschwindigkeit gebildet (von 1,1 über 1,9 bis auf 2,6 g/(kg TR·h)). Gleiches gilt für Iso-Valeriansäure, wo die Versäuerungsgeschwindigkeit von 0,63 über 0,78 auf 2,88 g/(kg TR·h) anstieg.

Ohne einen oxidativen Abbau würden in den betrachteten Zeiträumen aus der Versäuerung von 10 g TR durchschnittlich 4,04 g Essigsäure, 0,84 g Propionsäure, 0,22 g Iso-Buttersäure, 0,58 g Buttersäure und 0,29 g Iso-Valeriansäure gebildet worden sein.

#### 4.1.8 Ammonium-Stickstoff

Bei den 7 mit einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  durchgeführten Versuchen wurden nach Belüftungszeiten von 96 – 100 h Eliminationsgrade von 14 % (V122) bis 57 % (V130) erzielt (Abb. 4.60). Im Mittel lag der Eliminationsgrad bei 35 %. Abgesehen von den Versuchen 122 und 123 zeigten die Kurven einen einheitlichen Verlauf.

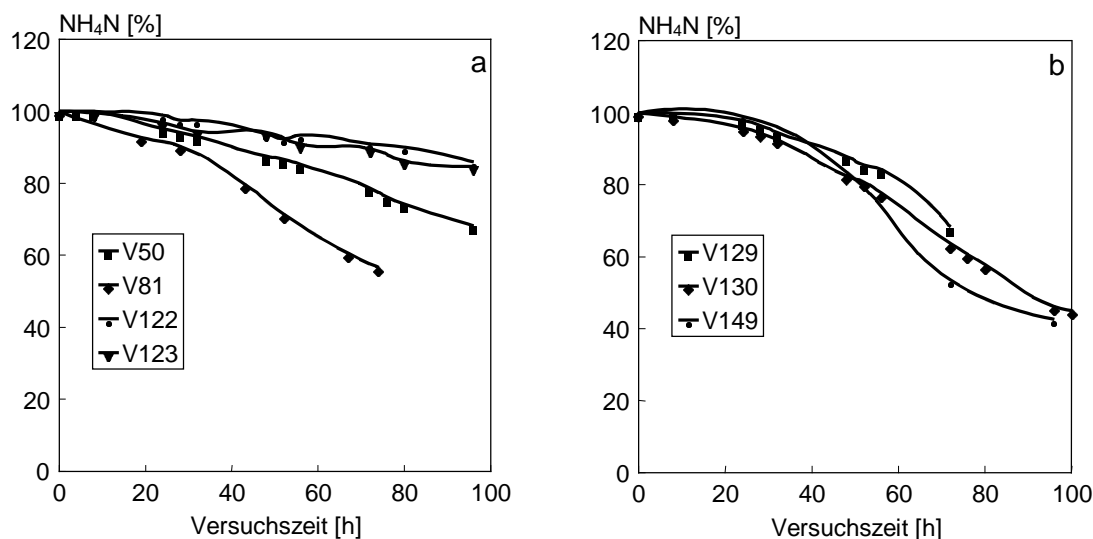


Abb. 4.60 a und b: Verlauf der  $\text{NH}_4\text{N}$ -Konzentration in Abhängigkeit von der Belüftungszeit bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$

Die Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten ( $k$ ) für die  $\text{NH}_4\text{N}$ -Elimination bei einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  wurden mit einer exponentiellen Regression bei festgelegtem Schnittpunkt der y-Achse (100 %) errechnet (Tab. 4.37). Sie lagen zwischen  $0,0013/\text{h}$  (V122) und  $0,0079/\text{h}$  (V149) und ergaben in der Tendenz einen eindeutigen Zusammenhang mit der bei der Belüftung erzielten Maximaltemperatur.

Tab. 4.37:  $\text{NH}_4\text{N}$ -Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$

V-Nr	$\text{NH}_4\text{N}_0$ [g/kg]	Zeitintervall [h]	Zahl der Messpunkte	$k$ [1/h]	$r^2$	T, max [°C]
50	4,17	0 – 96	13	0,0034	0,94	54,9
81	5,31	0 – 71	7	0,0068	0,92	60,8
122	2,14	0 – 96	11	0,0013	0,92	49,4
123	3,88	0 – 96	9	0,0017	0,97	48,3
129	7,26	0 – 68	9	0,0035	0,74	50,5
130	7,30	0 – 100	13	0,0065	0,86	67,7
149	5,31	0 – 96	5	0,0079	0,86	71,3

Belüftungsraten von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  ergaben bei Belüftungszeiten von 90 – 100 h Eliminationsgrade von 52 % (V106) bis 89 % (V145) (Abb. 4.61). Im Mittel wurde ein Eliminationsgrad von 72 % erzielt. Die Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten lagen zwischen  $0,0035/\text{h}$  (V 52) und



0,0192/h (V 145) (Tab. 4.39). Die Verdopplung der Belüftungsrate von 5 auf 10 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>·h führte somit im Mittel auch zu einer Verdopplung der NH<sub>4</sub>N-Elimination.

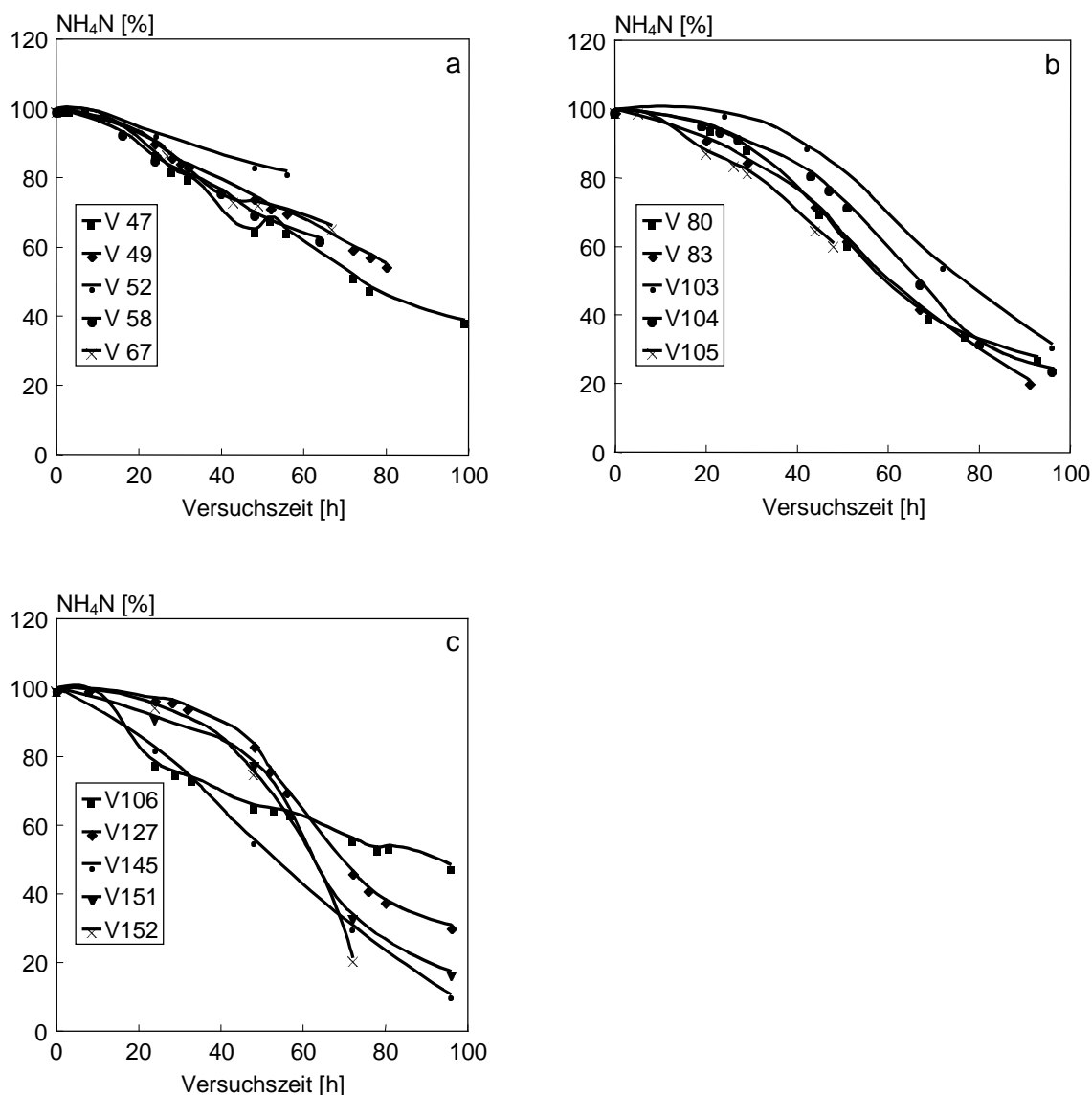


Abb. 4.61 a, b und c: Verlauf der NH<sub>4</sub>N-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) führten zu einer weiteren, geringfügigen Steigerung der NH<sub>4</sub>N-Elimination (Abb. 4.62). Die nach 90 – 100 h erzielten Eliminationsgrade schwankten zwischen 46 % (V129) und 83 % (V116, V119, V125). Im Mittel aller Versuche wurde nach 90 – 100 h Belüftungszeit 70 % des Ammonium-Stickstoffs eliminiert. Unter Vernachlässigung der Versuche 28, 29 und 30, bei denen keine Selbterhitzung stattfand, sowie der Versuche 72, 124 und 126, die einen offensichtlich untypischen Verlauf aufwiesen, lag der mittlere Eliminationsgrad bei 78 %. Die Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten bewegten sich zwischen 0,0058/h (V124) und 0,0262/h (V132) (Tab. 4.40). Die für die unterschiedlichen Belüftungsrate erzielten Geschwindigkeits-Konstanten waren von der bei der Belüftung erzielten Maximaltemperatur abhängig. Zur besseren Übersicht wurden sie in Temperatur-bereiche eingeteilt. Lagen in einem Temperaturbereich mehrere Ergebnisse vor, wurden sie gemittelt. Die Ergebnisse zeigen neben der Temperaturabhängigkeit der

Geschwindigkeits-Konstanten auch eine eindeutige Abhängigkeit von der Belüftungsrate (Tab. 4.38).

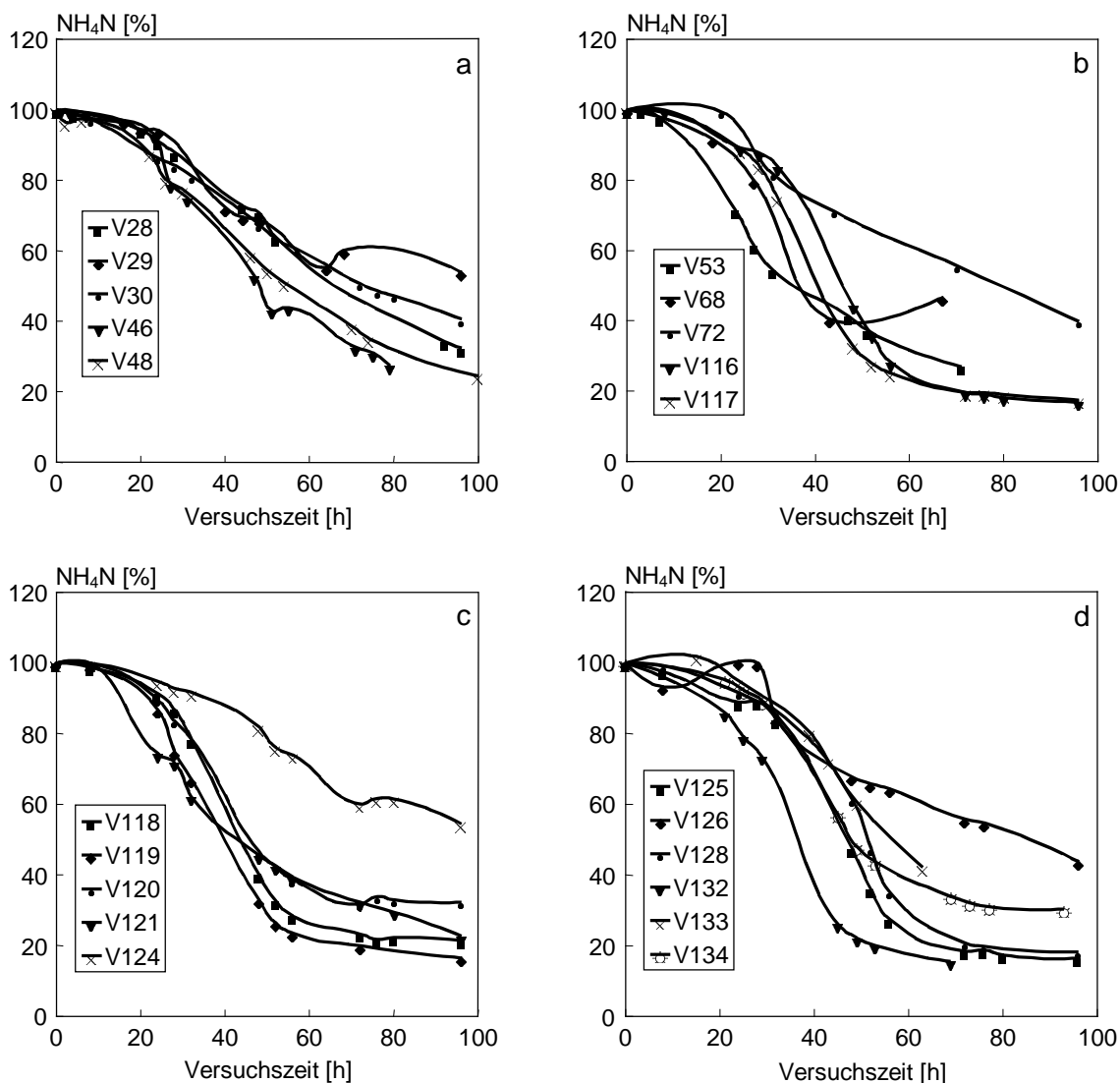


Abb. 4.62 a, b, c und d: Verlauf der  $\text{NH}_4\text{N}$ -Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

Tab. 4.38: Abhängigkeit der  $\text{NH}_4\text{N}$ -Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten von der Belüftungsrate und der bei der Belüftung erzielten Maximaltemperatur, Angaben in  $1/\text{h}$

T, max [°C]	Belüftungsrate [ $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ]					
	5	n	10	n	20	n
20 – 29,9	-	0	-	0	0,0072	1
30 – 39,9	-	0	0,0035	1	0,0114	3
40 – 49,9	0,0015	2	0,0079	1	0,0130	1*
50 – 59,9	0,0035	2	0,0072	4	0,0140	5
60 – 69,9	0,0067	2	0,0114	7	0,0194	7
70 – 79,9	0,0079	1	0,0171	2	0,0195	1

n= Anzahl der Versuche, \*= V72, V 124, V 126 nicht berücksichtigt

Tab. 4.39:  $\text{NH}_4\text{N}$ -Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$

V-Nr	$\text{NH}_4\text{N}_0$ [g/kg]	Zeitintervall [h]	Zahl der Messpunkte	k [1/h]	$r^2$	T, max [°C]
47	4,14	0 – 99	13	0,0087	0,96	56,5
49	4,23	0 – 80	11	0,0067	0,96	55,3
52	4,22	0 – 56	5	0,0035	0,99	36,9
58	4,99	0 – 64	6	0,0070	0,98	52,5
67	5,23	0 – 67	6	0,0062	0,96	55,9
80	5,82	0 – 93	8	0,0122	0,88	62,0
83	5,13	0 – 91	7	0,0131	0,80	62,4
103	7,14	0 – 96	5	0,0095	0,77	66,4
104	7,64	0 – 96	10	0,0110	0,92	68,6
105	3,91	0 – 48	7	0,0088	0,98	64,1
106	1,86	0 – 96	12	0,0079	0,98	46,5
127	7,16	0 – 96	12	0,0096	0,77	69,7
145	4,67	0 – 96	5	0,0192	0,88	72,8
151	5,15	0 – 96	5	0,0150	0,83	70,0
152	5,16	0 – 72	4	0,0155	0,68	65,2

Tab. 4.40:  $\text{NH}_4\text{N}$ -Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$

V-Nr	$\text{NH}_4\text{N}_0$ [g/kg]	Zeitintervall [h]	Zahl der Messpunkte	k [1/h]	$r^2$	T, max [°C]
28	4,23	0 – 96	10	0,0101	0,90	32,0
29	2,26	0 – 96	10	0,0072	0,90	27,5
30	3,26	0 – 96	13	0,0090	0,98	30,5
46	4,06	0 – 79	12	0,0150	0,94	36,5
48	4,17	0 – 100	12	0,0130	0,96	49,2
53	4,54	0 – 71	9	0,0183	0,99	55,5
68	5,21	0 – 67	5	0,0132	0,75	56,0
72	4,20	0 – 96	6	0,0086	0,93	45,0
116	5,77	0 – 96	12	0,0195	0,89	71,0
117	6,39	0 – 96	12	0,0203	0,89	68,4
118	6,20	0 – 96	12	0,0181	0,88	68,6
119	6,43	0 – 96	10	0,0206	0,89	67,3
120	6,27	0 – 96	12	0,0137	0,89	63,4
121	3,34	0 – 96	11	0,0155	0,98	53,4
124	6,49	0 – 96	12	0,0058	0,91	49,0
125	6,44	0 – 95	12	0,0197	0,88	69,9
126	2,08	0 – 96	11	0,0077	0,88	43,8
128	7,22	0 – 96	11	0,0172	0,84	68,4
132	6,15	0 – 69	8	0,0262	0,84	68,1
133	6,21	0 – 63	7	0,0097	0,74	58,0
134	6,40	0 – 93	11	0,0134	0,88	59,2

Mit den temperaturabhängigen Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten aus Tab. 4.38 lassen sich die  $\text{NH}_4\text{N}$ -Eliminationsgrade ( $x_{\text{NH}_4\text{N}}$ ) für die getesteten Belüftungsrate mit der Gleichung

$$x_{\text{NH}_4\text{N}} = (1 - \exp(-k \cdot t)) \cdot 100$$

berechnen (Tab. 4.41). Bei einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  können bei Maximaltemperaturen von  $70 - 79,9 \text{ }^\circ\text{C}$  innerhalb von 100 h Belüftungszeit rechnerisch 54,6 % des Ammonium-Stickstoffs eliminiert werden. Geringere Maximaltemperaturen oder kürzere Belüftungszeiten ergeben sinkende Eliminationsgrade. Unterhalb einer Maximaltemperatur von  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  fand bei dieser Belüftungsrate praktisch keine Elimination von Ammonium-Stickstoff statt (Tab. 4.41, Abb. 4.63 a). Bei dieser Belüftungsrate werden organische Säuren aus der Versäuerung gebildet, aber auch zu Kohlendioxid oxidiert. Dieses wird jedoch nur in geringerem Umfang aus der Gülle ausgestrippt. Bedingt durch den Kohlensäure-Puffer ergeben sich somit tendenziell niedrigere pH-Werte als bei höheren Belüftungsrate (Abb. 4.4). Geringere pH-Werte führen entsprechend des  $\text{NH}_3/\text{NH}_4$ -Dissoziationsgleichgewichtes zu einer Verringerung der stripptbaren Ammoniakkonzentration. Ferner ist es unter diesen Bedingungen wahrscheinlich, dass Ammonifikation und mikrobielles Wachstum mit vergleichbaren Geschwindigkeiten erfolgen. Oberhalb einer Maximaltemperatur von  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  ist ein starker Temperatureinfluss feststellbar. Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  führten bei allen Temperaturen bei vergleichbaren Versuchszeiten zu einer deutlichen Steigerung der  $\text{NH}_4\text{N}$ -Elimination (Tab. 4.41, Abb. 4.63 b). Unter diesen Bedingungen könnten nach 100 h Belüftungszeit bis zu 81,9 % des Ammonium-Stickstoffs eliminiert werden. Dies entspricht einer Steigerung der  $\text{NH}_4\text{N}$ -Elimination von 50 % gegenüber einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ . Ein starker Temperatureinfluss tritt oberhalb von  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  auf.

Tab. 4.41: Erzielbare  $\text{NH}_4\text{N}$ -Elimination in Abhängigkeit von der Belüftungsrate, der Maximaltemperatur und der Belüftungszeit unter Verwendung der errechneten Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten, Angaben in [%]

BLR [ $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ]	T, max [ $^\circ\text{C}$ ]	Versuchszeit [h]				
		20	40	60	80	100
5	20 – 29,9	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	30 – 39,9	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	40 – 49,9	3,0	5,8	8,6	11,3	13,9
	50 – 59,9	6,8	13,1	18,9	24,4	29,5
	60 – 69,9	12,5	24,5	33,1	41,5	48,8
	70 – 79,9	14,6	27,1	37,7	46,8	54,6
10	20 – 29,9	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	30 – 39,9	6,8	13,1	18,9	24,4	29,5
	40 – 49,9	14,6	27,1	37,7	46,8	54,6
	50 – 59,9	13,4	25,0	35,1	43,8	51,3
	60 – 69,9	20,4	36,6	49,5	59,8	68,0
	70 – 79,9	29,0	49,5	64,2	74,5	81,9
20	20 – 29,9	13,4	25,0	35,1	43,8	51,3
	30 – 39,9	20,4	36,6	49,5	59,8	68,0
	40 – 49,9*	22,9	40,5	54,2	64,7	72,7
	50 – 59,9	24,4	42,9	56,8	67,4	75,3
	60 – 69,9	32,2	54,0	68,8	78,8	85,6
	70 – 79,9	32,3	54,2	69,0	79,0	85,8

n. b. : nicht bestimmt, \* Daten von V 48

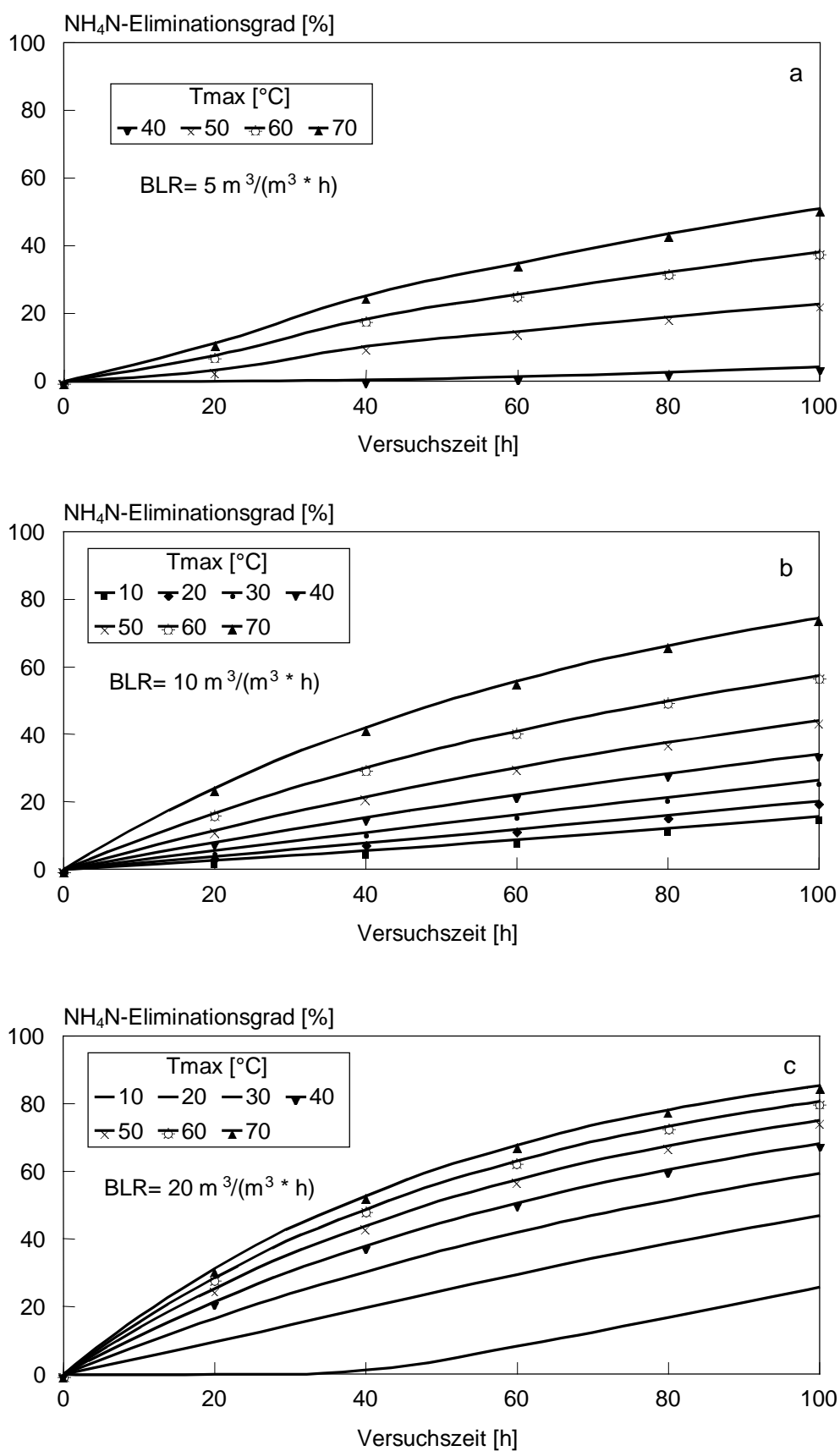


Abb. 4.63 a, b, c: Einfluss der Belüftungsrate und der Maximaltemperatur auf die erreichbare NH<sub>4</sub>N-Elimination bei der Belüftung separierter Schweinegülle

Belüftungsraten von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  ergeben eine weitere Steigerung der  $\text{NH}_4\text{N}$ -Elimination (Tab. 4.41, Abb. 4.63 c). Bei Maximaltemperaturen von über  $70^\circ\text{C}$  würden innerhalb von 100 h Belüfungszeit 85,8% des Ammonium-Stickstoffs eliminiert, was gegenüber einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  einer Steigerung von 13 – 21 % entspräche. Ein starker Temperatureinfluss ist bei Temperaturen unterhalb von  $40^\circ\text{C}$  erkennbar.

Aus den in Abb. 4.63 a, b, und c dargestellten Daten kann durch eine logarithmische Kurvenanpassung die zur Erzielung eines bestimmten  $\text{NH}_4\text{N}$ -Eliminationsgrades erforderliche Mindestluftmenge, bzw. das Luft/Gülle-Verhältnis berechnet werden (Abb. 4.64).

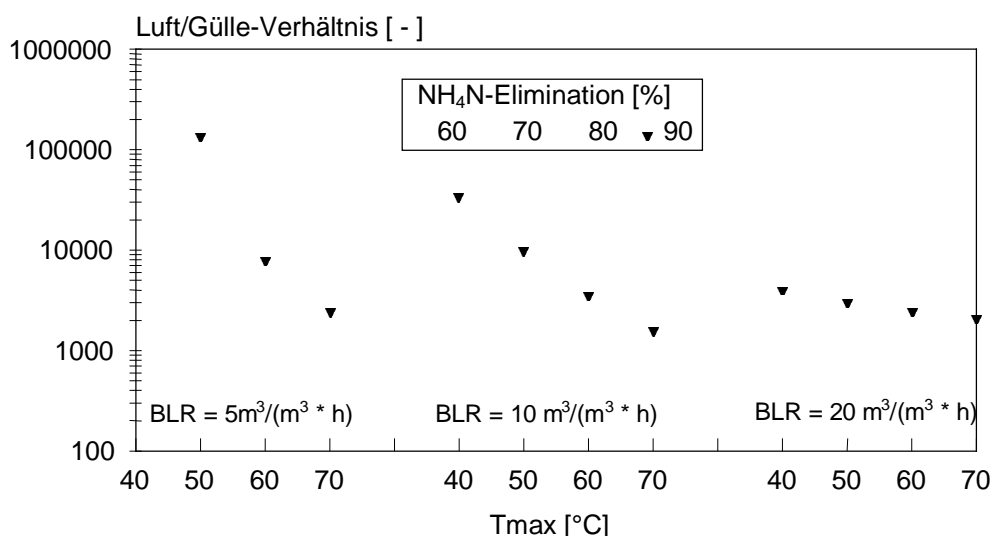


Abb. 4.64: Erforderliches Luft/Gülle-Verhältnis zur Erzielung eines  $\text{NH}_4\text{N}$ -Eliminationsgrades von 60, 70, 80 und 90 % in Abhängigkeit von der erzielten Maximaltemperatur und der gewählten Belüftungsrate bei der Belüftung separierter Schweinegülle

Bei Belüftungsraten von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  ist mit vertretbarem Aufwand eine 60 % ige oder höhere Ammonium-Stickstoff-Elimination selbst bei Maximaltemperaturen bis über  $70^\circ\text{C}$  nicht zu erreichen. Hierfür wäre eine theoretische Mindestbelüfungszeit von 156 h oder ein Luft/Gülle-Verhältnis von 780 erforderlich. Belüfungszeiten von 66 h bzw. 91 h erlauben bei Belüftungsraten von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  Wirkungsgrade von 60 % bzw. 70 %, sofern Maximaltemperaturen von  $70^\circ\text{C}$  erreicht werden. Wirkungsgrade von 60 % lassen sich bei Belüftungsraten von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  nach 79 h ( $40^\circ\text{C}$ ), 63 h ( $50^\circ\text{C}$ ), 54 h ( $60^\circ\text{C}$ ) bzw. 48 h ( $70^\circ\text{C}$ ) erzielen. Für eine 70 % ige  $\text{NH}_4\text{N}$ -Elimination wären 87 h ( $50^\circ\text{C}$ ), 73 h ( $60^\circ\text{C}$ ) bzw. 64 h ( $70^\circ\text{C}$ ) erforderlich. Innerhalb von 100 h Belüfungszeit würden 80 % ige Wirkungsgrade nach 99 h ( $60^\circ\text{C}$ ) bzw. 86 h ( $70^\circ\text{C}$ ) erreicht werden.

Für eine effektive  $\text{NH}_4\text{N}$ -Elimination bei möglichst geringem Luft/Gülle-Verhältnis ist im Regelfall eine Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  die günstigste Variante. Dies gilt im besonderen für Temperaturbereiche von  $40 - 60^\circ\text{C}$ . Lediglich bei Temperaturen von  $70^\circ\text{C}$  kann mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  bei geringerem Luft/Gülle-Luftverhältnis eine vergleichbare Elimination erzielt werden.

#### 4.1.9 Gesamtstickstoff

Bei den insgesamt 7 Versuchen mit einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  wurden innerhalb von 96 h 8 (V122) bis 38,1 % (V149) des Gesamtstickstoffs eliminiert (Abb. 4.65 a und b). In den ersten 20 h fand praktisch keine N-Elimination statt.

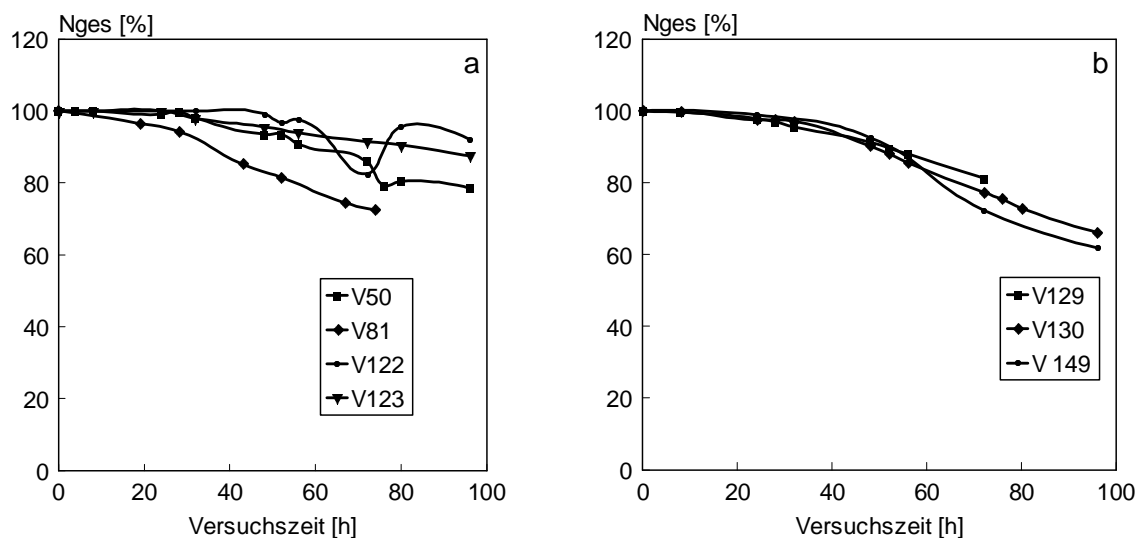


Abb. 4.65a, b: Verlauf der Gesamtstickstoff-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$

Die Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten ( $k$ ) für die Nges-Elimination wurden mit einer exponentiellen Regression bei festgelegtem Schnittpunkt der y-Achse (100 %) errechnet (Tab. 4.42). Sie lagen zwischen  $0,0012/\text{h}$  (V123) und  $0,0042/\text{h}$  (V149) und ergaben in der Tendenz einen eindeutigen Zusammenhang mit der bei der Belüftung erzielten Maximaltemperatur.

Tab. 4.42: Nges-Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$

V-Nr	Nges <sub>0</sub> [g/kg]	Zeitintervall [h]	Zahl der Messpunkte	k [1/h]	r <sup>2</sup>	T, max [°C]
50	5,53	0 – 96	13	0,0022	0,82	54,9
81	6,88	0 – 74	7	0,0041	0,94	60,8
122	2,61	0 – 96	10	0,0006	0,70	49,4
123	4,73	0 – 96	9	0,0012	0,91	48,3
129	9,32	0 – 72	9	0,0022	0,86	50,5
130	9,31	0 – 96	12	0,0034	0,85	67,7
149	6,33	0 – 96	5	0,0042	0,84	71,3

Bei den insgesamt 15 Versuchen, die mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  durchgeführt wurden (Abb. 4.66 a, b und c), schwankte die nach 96 h erzielte Nges-Elimination zwischen

36,2 (V106) und 62,5 % (V145). Die Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten bewegten sich zwischen 0,0018/h (V52) und 0,0099/h (V145) (Tab. 4.43) und lagen damit deutlich über denen, die bei einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  errechnet wurden.

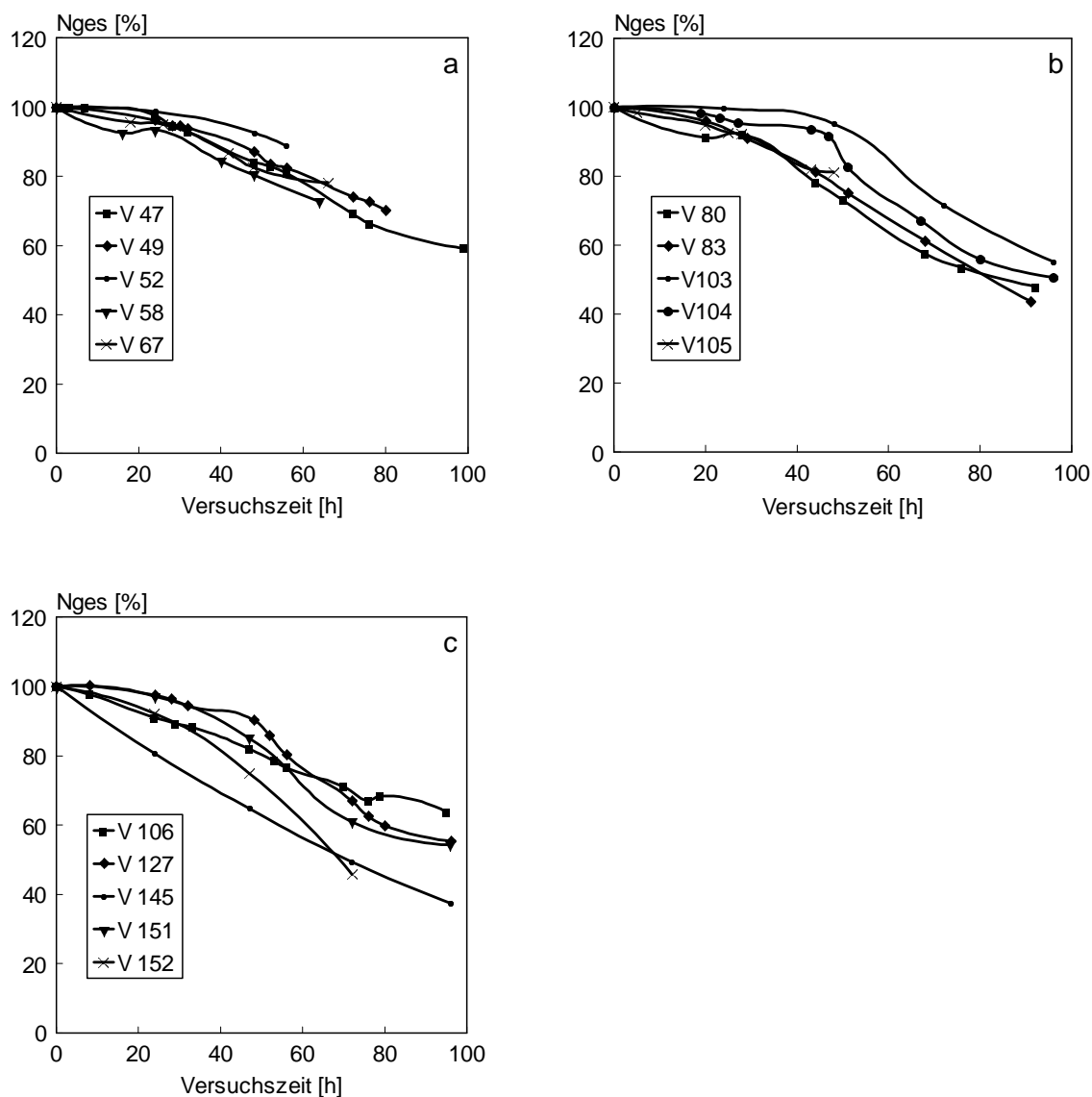


Abb. 4.66 a, b und c: Verlauf der Gesamtstickstoff-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

Mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  wurden 21 Versuche durchgeführt (Abb. 4.67 a, b, c und d). Die nach 96 h erreichte Nges-Elimination schwankte zwischen 27,3 (V29) und 58,4 % (V53). Die Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten bewegten sich zwischen 0,0037/h (V124, V126) und 0,0115/h (V132) (Tab. 4.44). Im Vergleich zu den Versuchen mit einer Belüftungsrate von 5 bzw.  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  wurde somit in der Tendenz nochmals eine Steigerung der Geschwindigkeits-Konstante erreicht.



Tab. 4.43: Nges-Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

V-Nr	Nges <sub>0</sub> [g/kg]	Zeitintervall [h]	Zahl der Messpunkte	k [1/h]	r <sup>2</sup>	T, max [°C]
47	5,45	0 – 99	12	0,0046	0,91	56,5
49	5,51	0 – 80	10	0,0037	0,88	55,3
52	5,37	0 – 56	4	0,0018	0,86	36,9
58	6,18	0 – 64	6	0,0046	0,96	52,5
67	6,85	0 – 66	6	0,0036	0,94	55,9
80	7,24	0 – 92	8	0,0075	0,93	62,0
83	6,78	0 – 91	7	0,0073	0,86	62,4
103	9,02	0 – 96	5	0,0048	0,77	66,4
104	9,63	0 – 96	10	0,0055	0,76	68,6
105	5,05	0 – 48	7	0,0040	0,92	64,1
106	2,50	0 – 95	12	0,0047	0,98	46,5
127	9,15	0 – 96	12	0,0051	0,81	69,7
145	5,57	0 – 96	5	0,0099	1,00	72,8
151	5,99	0 – 96	5	0,0060	0,89	70,0
152	6,40	0 – 72	4	0,0090	0,85	65,2

Tab. 4.44: Nges-Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

V-Nr	Nges <sub>0</sub> [g/kg]	Zeitintervall [h]	Zahl der Messpunkte	k [1/h]	r <sup>2</sup>	T, max [°C]
28	5,05	0 – 96	9	0,0061	0,90	32,0
29	2,80	0 – 96	9	0,0031	0,97	27,5
30	4,26	0 – 96	12	0,0060	0,97	30,5
46	5,39	0 – 95	13	0,0083	0,95	36,5
48	5,47	0 – 100	12	0,0083	0,97	49,2
53	5,44	0 – 96	10	0,0108	0,94	55,5
68	6,83	0 – 96	6	0,0059	0,96	56,0
72	5,21	0 – 96	6	0,0053	0,96	45,0
116	7,63	0 – 96	12	0,0080	0,90	71,0
117	8,41	0 – 96	12	0,0084	0,89	68,4
118	8,31	0 – 96	12	0,0070	0,89	68,6
119	8,83	0 – 96	12	0,0090	0,91	67,3
120	8,40	0 – 96	12	0,0061	0,92	63,4
121	4,11	0 – 96	11	0,0074	0,97	53,4
124	8,38	0 – 96	12	0,0037	0,91	49,0
125	8,18	0 – 96	12	0,0080	0,90	69,9
126	2,75	0 – 96	11	0,0037	0,74	43,8
128	9,10	0 – 96	11	0,0085	0,89	68,4
132	7,62	0 – 69	8	0,0115	0,86	68,1
133	7,56	0 – 63	7	0,0044	0,69	58,0
134	7,87	0 – 93	11	0,0070	0,88	59,2

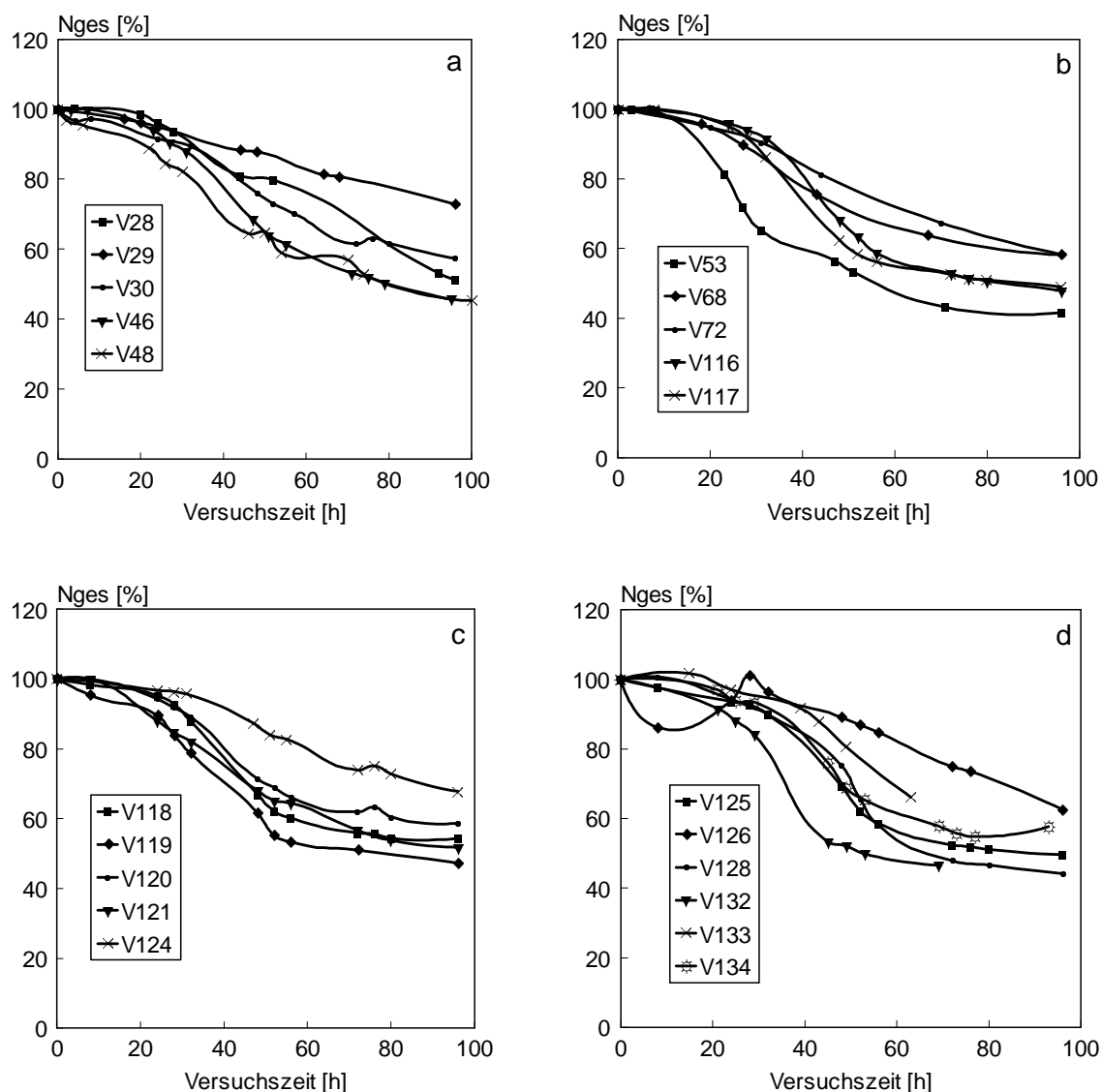


Abb. 4.67 a, b, c und d: Verlauf der Gesamtstickstoff-Konzentration bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

Die für die unterschiedlichen Belüftungsraten erzielten Geschwindigkeits-Konstanten waren von der bei der Belüftung erzielten Maximaltemperatur abhängig. Zur besseren Übersicht wurden sie in Temperaturbereiche eingeteilt. Lagen in einem Temperaturbereich mehrere Ergebnisse vor, wurden sie gemittelt. Die Ergebnisse zeigen neben der Temperaturabhängigkeit der Geschwindigkeits-Konstanten auch eine eindeutige Abhängigkeit von der Belüftungsrate (Tab. 4.45). Unter Verwendung der temperaturabhängigen Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten aus Tab. 4.45 lassen sich die Nges-Eliminationsgrade ( $x_{Nges}$ ) für die getesteten Belüftungsraten mit der Gleichung

$$x_{Nges} = (1 - \exp(-k \cdot t)) \cdot 100$$

berechnen (Tab. 4.46). Die innerhalb von 100 h erzielbare maximale Nges-Elimination liegt auf der Grundlage der vorliegenden Ergebnisse bei etwa 50 – 60 %. Bei maximalen Gülletemperaturen oberhalb von 60 °C führt die Verdopplung der Belüftungsrate von 10 auf 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) zu keiner bedeutsamen Steigerung der nach 100 h erzielbaren Nges-Elimination. Demgegenüber wird bei kürzeren Belüftungszeiten und/oder geringeren Temperaturen die höchste Nges-Elimination generell mit der höchsten Belüftungsrate erzielt.

Tab. 4.45: Abhängigkeit der Nges-Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten von der Belüftungsrate und der bei der Belüftung erzielten Maximaltemperatur, Angaben in [1/h]

T, max [°C]	Belüftungsrate [m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·h)]					
	5	n	10	n	20	n
20 – 29,9	-	0	-	0	0,0031	1
30 – 39,9	-	0	0,0018	1	0,0068	3
40 – 49,9	0,0009	2	0,0047	1	0,0068	2
50 – 59,9	0,0022	2	0,0041	4	0,0071	5
60 – 69,9	0,0038	2	0,0062	7	0,0084	7
70 – 79,9	0,0042	1	0,0075	2	0,0080	1

n= Anzahl der Versuche

Tab. 4.46: Erzielbare Nges-Elimination in Abhängigkeit von der Belüftungsrate, der Maximaltemperatur und der Belüftungszeit unter Verwendung der errechneten Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten, Angaben in [%]

BLR [m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·h)]	T, max [°C]	Versuchszeit [h]				
		20	40	60	80	100
5	20 – 29,9	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	30 – 39,9	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	40 – 49,9	1,8	3,5	5,3	6,9	8,6
	50 – 59,9	4,3	8,4	12,4	16,1	19,7
	60 – 69,9	7,3	14,1	20,4	26,2	31,6
	70 – 79,9	8,1	15,5	22,3	27,5	34,3
10	20 – 29,9	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	30 – 39,9	3,5	6,9	10,2	13,4	16,5
	40 – 49,9	9,0	17,1	24,6	31,3	37,5
	50 – 59,9	7,9	15,1	21,8	28,0	33,6
	60 – 69,9	11,7	22,0	31,1	39,1	46,2
	70 – 79,9	13,9	25,9	36,2	45,1	52,8
20	20 – 29,9	6,0	11,7	17,0	22,0	26,7
	30 – 39,9	12,7	23,8	33,5	42,0	49,3
	40 – 49,9	12,7	23,8	33,5	42,0	49,3
	50 – 59,9	13,2	24,7	34,7	43,3	50,8
	60 – 69,9	15,5	28,5	39,6	48,9	56,8
	70 – 79,9	14,8	27,4	38,1	47,3	55,1

Aus der  $BSB_5$ -Konzentration der Ausgangsgülle lässt sich die theoretisch erzielbare Maximaltemperatur für die einzelnen Belüftungsraten errechnen (Kap.4.1.3, Abb. 4.20). Unter Verwendung der Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten, die bei der betreffenden Maximaltemperatur und der gewählten Belüftungsrate erreicht werden (Tab. 4.46), lassen sich für beliebige Luft/Gülle-Verhältnisse die erzielbaren Nges-Eliminationen berechnen. Ein Luft/Gülle-Verhältnis von 1000 bedeutet in diesem Zusammenhang, dass bei einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  die Versuchsdauer 200 h beträgt, bei  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  100 h und bei einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  dementsprechend 50 h.

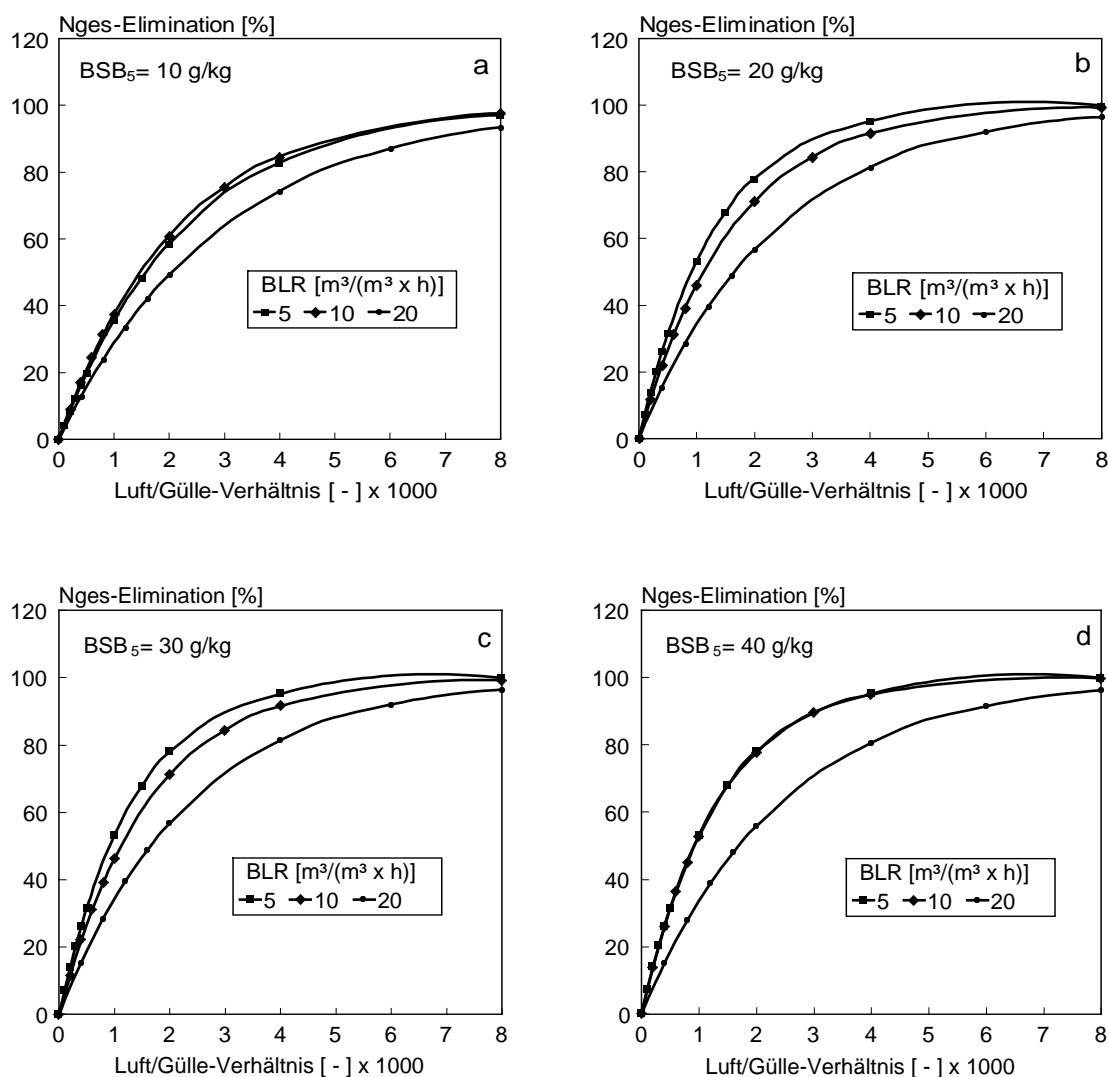


Abb. 4.68 a, b, c, d: Theoretisch erzielbare Nges-Elimination in Abhängigkeit der  $BSB_5$ -Konzentration und dem Luft/Gülle-Verhältnis bei der Belüftung separierter Schweinegülle

Da die Luftstrippung energieaufwendig ist, muss es das Ziel sein, bei einem möglichst kleinem Luft/Gülle-Verhältnis viel Stickstoff aus der Gülle zu eliminieren. Aus verfahrenstechnischer Sicht sollten die Belüftungszeiten jedoch möglichst kurz sein, um einen akzeptablen Gölledurchsatz bei einer vertretbaren Anlagengröße zu gewährleisten. Die graphische Darstellung der berechneten Nges-Eliminationen (Abb. 4.68 a, b, c und d) zeigt, dass die Nges-Elimination bei Belüftungsraten von 5 und  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  bei den

verschiedenen BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen sehr ähnlich verläuft, während sie bei Belüftungsraten von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) einen flacheren Verlauf aufweist.

Für eine 60 % ige Nges-Elimination wären demnach bei Belüftungsraten von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) und BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen von 10, 20 und 30 g/kg 416, 305 bzw. 241 h oder entsprechend Luft/Gülle-Verhältnisse von 2080, 1525 bzw. 1205 erforderlich. Die Ergebnisse bei einer BSB<sub>5</sub>-Konzentration von 40 g/kg sind mit denen, die bei 30 g/kg erzielt werden, identisch. Höhere BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen verkürzen die erforderliche Belüftungszeit bzw. verkleinern das Luft/Gülle-Verhältnis.

#### 4.1.10 Organischer Stickstoff

Bei der Belüftung separierter Schweinegülle kann durch die Selbsterhitzung und durch den pH-Wertanstieg Ammoniak aus der Gülle ausgestrippt werden. Ein Teil des umgesetzten Ammonium-Stickstoffs wird im Zuge des mikrobiellen Wachstums jedoch in organische Masse überführt und ist damit im Rahmen der Belüftung nicht mehr abtrennbar. Der Umfang dieser im größeren Umfang unerwünschten Stickstoffassimilation ist von der Belüftungsrate, der erzielten Maximaltemperatur und der Belüftungsdauer abhängig (Tab. 4.47).

Tab. 4.47: N-Strippung und N-Assimilation bei unterschiedlichen Temperaturbereichen während der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h), Angaben in [%]

T [°C]	Parameter	Versuchszeit [h]					
		0	20	40	60	80	100
40 – 49,9	N <sub>ges</sub> (k= 0,0009/h)	100,0	98,2	96,5	94,7	93,1	91,4
	NH <sub>4</sub> N (k= 0,0015/h)	79,0	76,7	74,4	72,2	70,1	68,0
	NH <sub>4</sub> N-Elimination	0	2,3	4,6	6,8	8,9	11,0
	Anteil N-Strippung	0	78,3	76,1	77,9	77,5	78,2
	Anteil N-Assimilation	0	21,7	23,9	22,1	22,5	21,8
	F [ - ]	-	3,6	3,2	3,5	3,4	3,6
50 – 59,9	N <sub>ges</sub> (k= 0,0022/h)	100,0	95,7	91,6	87,6	83,9	80,3
	NH <sub>4</sub> N (k= 0,0035/h)	79,0	73,7	68,7	64,0	59,7	55,7
	NH <sub>4</sub> N-Elimination	0	5,3	10,3	15,0	19,3	23,3
	Anteil N-Strippung	0	81,1	81,6	82,7	83,4	84,5
	Anteil N-Assimilation	0	18,9	18,4	17,3	16,6	15,5
	F [ - ]	-	4,3	4,4	4,8	5,0	5,5
60 – 69,9	N <sub>ges</sub> (k= 0,0038/h)	100,0	92,7	85,9	79,6	73,8	68,4
	NH <sub>4</sub> N (k= 0,0067/h)	79,0	69,1	60,4	52,9	46,2	40,4
	NH <sub>4</sub> N-Elimination	0	9,9	18,6	26,1	32,8	38,6
	Anteil N-Strippung	0	73,7	75,8	78,2	79,9	81,9
	Anteil N-Assimilation	0	26,3	24,2	21,8	20,1	18,1
	F [ - ]	-	2,8	3,1	3,6	4,0	4,5
70 – 79,9	N <sub>ges</sub> (k= 0,0042/h)	100,0	91,9	84,5	77,7	72,5	65,7
	NH <sub>4</sub> N (k= 0,0079/h)	79,0	67,5	57,6	49,2	42,0	35,9
	NH <sub>4</sub> N-Elimination	0	11,5	21,4	29,8	37,0	43,1
	Anteil N-Strippung	0	70,4	72,4	74,5	74,3	79,6
	Anteil N-Assimilation	0	29,6	27,6	25,5	25,8	20,4
	F [ - ]	-	2,4	2,6	2,9	2,9	3,9

F= Verhältnis der N-Strippung zur N-Assimilation

Die Stickstoffassimilation lässt sich unter Verwendung der temperaturabhängigen Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten für Ammonium (Tab. 4.38) und Gesamt-Stickstoff (Tab. 4.42) berechnen.

Da in der Gülle praktisch kein Nitrat vorliegt und Nitrifikationsprozesse aufgrund der hohen organischen Belastung in Verbindung mit geringen Sauerstoff-, aber hohen Ammoniak-Konzentrationen in den betrachteten Versuchszeiträumen nicht auftreten, ergibt sich die Stickstoffassimilation aus der Differenz der Ammonium-Elimination und der Gesamtstickstoff-Elimination.

Bezogen auf den Gesamtstickstoffgehalt zu Versuchsbeginn und unter Berücksichtigung eines gemittelten  $\text{NH}_4\text{N}/\text{N}_{\text{ges}}$ -Verhältnis von 0,79 wurden beispielsweise bei einer Maximaltemperatur von 40 - 49,9 °C und einer Belüftungsrate von 5  $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  in den ersten 20 h 1,8 % des Gesamtstickstoffs und 2,3 % des Ammoniumstickstoffs eliminiert. Demnach wurden 78,3 % des eliminierten Ammoniumstickstoffs als Ammoniak gestrippt und 21,7 % assimiliert (Tab. 4.47). Der Anteil des assimilierten Stickstoffs nahm mit der Belüftungsdauer bei allen Temperaturbereichen ab und lag bei Versuchsende bei 19 % im Mittel, bezogen auf den Gesamtstickstoffgehalt zu Versuchsbeginn.

Bei einer Belüftungsrate von 10  $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  nahm der Anteil des assimilierten Stickstoffs ebenfalls mit der Belüftungsdauer ab und lag bei Versuchsende bei durchschnittlich 18 %. Eine vergleichbare N-Assimilation wurde auch bei Belüftungsraten von 20  $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  festgestellt.

Ein Vergleich aller Belüftungsraten und Temperaturbereiche zeigt, dass in den ersten Versuchsstunden relativ viel Stickstoff assimiliert wurde und dieser Anteil mit zunehmender Belüftungszeit abnahm. Tendenziell war die Stickstoffassimilation bei Güllen, die in Folge einer hohen  $\text{BSB}_5$ -Konzentration eine starke Selbsterhitzung ermöglichten, stärker ausgeprägt als bei Güllen, bei denen nur eine geringe Selbsterhitzung auftrat. Außerdem liegen die pH-Werte in feststoff- und  $\text{BSB}_5$ -reichen Güllen tendenziell unter denen von feststoff- und  $\text{BSB}_5$ -armen Güllen (Kap. 4.1.1). Die Konzentration organischen Stickstoffs nach 100 h Belüftungszeit lag jedoch generell über der Startkonzentration. Dies ist einer der Gründe dafür, dass eine Gesamtstickstoffelimination über 60 % im Rahmen der aerob-thermophilen Belüftung praktisch nicht erreicht werden kann.

Tab. 4.48: N-Strippung und N-Assimilation bei unterschiedlichen Temperaturbereichen während der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ , Angaben in [%]

T [°C]	Parameter	Versuchszeit [h]					
		0	20	40	60	80	100
30 – 39,9	N <sub>ges</sub> (k= 0,0018/h)	100,0	96,5	93,1	89,8	86,6	83,5
	NH <sub>4</sub> N (k= 0,0035/h)	79,0	73,7	68,7	64,0	59,7	55,7
	NH <sub>4</sub> N-Elimination	0	5,3	10,3	15,0	19,3	23,3
	Anteil N-Strippung	0	66,0	67,0	68,0	69,4	70,8
	Anteil N-Assimilation	0	34,0	33,0	32,0	30,6	29,2
	F [ - ]	-	1,9	2,0	2,1	2,3	2,4
40 – 49,9	N <sub>ges</sub> (k= 0,0047/h)	100,0	91,0	82,9	75,4	68,7	62,5
	NH <sub>4</sub> N (k= 0,0079/h)	79,0	67,5	57,6	49,2	42,0	35,9
	NH <sub>4</sub> N-Elimination	0	11,5	21,4	29,8	37,0	43,1
	Anteil N-Strippung	0	78,3	79,9	82,6	84,6	87,0
	Anteil N-Assimilation	0	21,7	20,1	17,4	15,4	13,0
	F [ - ]	-	3,6	4,0	4,7	5,5	6,7
50 – 59,9	N <sub>ges</sub> (k= 0,0041/h)	100,0	92,1	84,9	78,2	72,0	66,4
	NH <sub>4</sub> N (k= 0,0072/h)	79,0	68,4	59,2	51,3	44,4	38,5
	NH <sub>4</sub> N-Elimination	0	10,6	19,8	27,7	34,6	40,5
	Anteil N-Strippung	0	74,5	76,3	78,7	80,9	83,0
	Anteil N-Assimilation	0	25,5	23,7	21,3	19,1	17,0
	F [ - ]	-	2,9	3,2	3,7	4,2	4,9
60 – 69,9	N <sub>ges</sub> (k= 0,0062/h)	100,0	88,3	78,0	68,9	60,9	53,8
	NH <sub>4</sub> N (k= 0,0114/h)	79,0	62,9	50,1	39,9	31,7	25,3
	NH <sub>4</sub> N-Elimination	0	16,1	28,9	39,1	47,3	53,7
	Anteil N-Strippung	0	72,7	76,1	79,5	82,7	86,0
	Anteil N-Assimilation	0	27,3	23,9	20,5	17,3	14,0
	F [ - ]	-	2,7	3,2	3,9	4,8	6,1
70 – 79,9	N <sub>ges</sub> (k= 0,0075/h)	100,0	86,1	74,1	63,8	54,9	47,2
	NH <sub>4</sub> N (k= 0,0171/h)	79,0	56,1	39,9	28,3	20,1	14,3
	NH <sub>4</sub> N-Elimination	0	22,9	39,1	50,7	58,9	64,7
	Anteil N-Strippung	0	60,7	66,2	71,4	76,6	81,6
	Anteil N-Assimilation	0	39,3	33,8	28,6	23,4	18,4
	F [ - ]	-	1,5	2,0	2,5	3,3	4,4

F= Verhältnis der N-Strippung zur N-Assimilation

Tab. 4.49: N-Strippung und N-Assimilation bei unterschiedlichen Temperaturbereichen während der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , Angaben in [%]

T [°C]	Parameter	Versuchszeit [h]					
		0	20	40	60	80	100
20 – 29,9	N <sub>ges</sub> (k= 0,0031/h)	100,0	94,0	88,3	83,0	78,0	73,3
	NH <sub>4</sub> N (k= 0,0072/h)	79,0	68,4	59,2	51,3	44,4	38,5
	NH <sub>4</sub> N-Elimination	0	10,6	19,8	27,7	34,6	40,5
	Anteil N-Strippung	0	56,6	59,1	61,4	63,6	65,9
	Anteil N-Assimilation	0	43,4	40,9	38,6	36,4	34,1
	F [ - ]	-	1,3	1,4	1,6	1,7	1,9
30 – 39,9	N <sub>ges</sub> (k= 0,0068/h)	100,0	87,3	76,2	66,5	58,0	50,7
	NH <sub>4</sub> N (k= 0,0114/h)	79,0	62,9	50,1	39,9	31,7	25,3
	NH <sub>4</sub> N-Elimination	0	16,1	28,9	39,1	47,3	53,7
	Anteil N-Strippung	0	78,9	82,4	85,7	88,8	91,8
	Anteil N-Assimilation	0	21,1	17,6	14,3	11,2	8,2
	F [ - ]	-	3,7	4,6	6,0	7,9	11,2
40 – 49,9	N <sub>ges</sub> (k= 0,0068/h)	100,0	87,3	76,2	66,5	58,0	50,7
	NH <sub>4</sub> N (k= 0,0130/h)	79,0	60,9	47,0	36,2	27,9	21,5
	NH <sub>4</sub> N-Elimination	0	18,1	32,0	42,8	51,1	57,5
	Anteil N-Strippung	0	70,2	74,4	78,3	82,2	85,7
	Anteil N-Assimilation	0	29,8	25,6	21,7	17,8	14,3
	F [ - ]	-	2,4	2,9	3,6	4,6	6,0
50 – 59,9	N <sub>ges</sub> (k= 0,0071/h)	100,0	86,8	75,3	65,3	56,7	49,2
	NH <sub>4</sub> N (k= 0,0140/h)	79,0	59,7	45,1	34,1	25,8	19,5
	NH <sub>4</sub> N-Elimination	0	19,3	33,9	44,9	53,2	59,5
	Anteil N-Strippung	0	68,4	72,9	77,3	81,4	85,4
	Anteil N-Assimilation	0	31,6	27,1	22,7	18,6	14,6
	F [ - ]	-	2,2	2,7	3,4	4,4	5,8
60 – 69,9	N <sub>ges</sub> (k= 0,0084/h)	100,0	85,4	71,5	60,4	51,1	43,2
	NH <sub>4</sub> N (k= 0,0194/h)	79,0	53,6	36,4	24,7	16,7	11,4
	NH <sub>4</sub> N-Elimination	0	25,4	42,6	54,3	62,3	67,6
	Anteil N-Strippung	0	57,5	66,9	72,9	78,5	84,0
	Anteil N-Assimilation	0	42,5	33,1	27,1	21,5	16,0
	F [ - ]	-	1,4	2,0	2,7	3,7	5,3
70 – 79,9	N <sub>ges</sub> (k= 0,0080/h)	100,0	85,2	72,6	61,9	52,7	44,9
	NH <sub>4</sub> N (k= 0,0195/h)	79,0	53,5	36,2	24,5	16,6	11,2
	NH <sub>4</sub> N-Elimination	0	25,5	42,8	54,5	62,4	67,8
	Anteil N-Strippung	0	58,0	64,0	69,9	75,8	81,3
	Anteil N-Assimilation	0	42,0	36,0	30,1	24,2	18,7
	F [ - ]	-	1,4	1,8	2,3	3,1	4,3

F= Verhältnis der N-Strippung zur N-Assimilation



Die Tabellen 4.47 – 4.49 zeigen, dass die bei der Belüftung erzielten Maximaltemperaturen einen deutlichen Einfluss auf den Umfang der Stickstoffassimilation und den gesamten Stickstofffluss haben. Unter Verwendung der nach einer Belüftungszeit von 100 h bei den entsprechenden Temperaturbereichen erzielten Ergebnisse kann mit Hilfe logarithmischer Funktionsanpassungen auch für niedrigere Temperaturen der Umfang der Assimilation und der Strippung abgeschätzt werden (Abb. 4.69 a, b, c).

Bei Belüftungsraten von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  tritt auf der Grundlage der Berechnungen unterhalb von  $38^\circ\text{C}$  praktisch keine Strippung auf, während bei Belüftungsraten von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  ab  $22^\circ\text{C}$  mit einer Strippung zu rechnen ist. Bei Belüftungsraten von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  findet eine Strippung bereits bei Temperaturen von  $7^\circ\text{C}$  statt.

Bei einer Belüftungsdauer von 100 h und einer Maximaltemperatur unter  $38^\circ\text{C}$  sowie einer Belüftungsrate von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  findet nach den Berechnungen keine Netto-Assimilation von Stickstoff statt. Dies dürfte auf eine unter diesen Bedingungen verstärkt auftretende Ammonifikation zurückzuführen sein. Oberhalb von  $38^\circ\text{C}$  liegt die Stickstoffassimilation bei 17 – 19 % des N-Umsatzes. Dementsprechend würden unter diesen Bedingungen 81 – 83 % des umgesetzten Stickstoffs gestrippt werden.

Belüftungsraten von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  würden nach den Berechnungen bei Temperaturen von bis zu  $22^\circ\text{C}$  innerhalb von 100 h Belüftungszeit zu einer vollständigen N-Assimilation führen, die mit steigender Temperatur auf Werte von 16 – 18 % abnimmt. Der Anteil der Strippung würde dementsprechend 82 – 84 % des Stickstoffumsatzes ausmachen.

Bei Maximaltemperaturen von bis zu  $7^\circ\text{C}$  würde bei einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  der Stickstoff vollständig assimiliert werden. Mit steigender Temperatur nimmt dieser Anteil jedoch rapide ab und beträgt dann nur noch 15 – 18 %. Der Anteil der Strippung nach 100 h Belüftungszeit würde dementsprechend bei 82 – 85 % liegen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass unter den beschriebenen Bedingungen 81 – 85 % des umgesetzten Stickstoffs als Ammoniak eliminiert werden können, während 15 – 19 % assimilatorisch in Biomasse festgelegt werden. Die Assimilation von Stickstoff ist von der Temperatur, aber vor allem von der Belüftungsrate abhängig. Hohe Belüftungsraten erlauben auch bei niedrigeren Temperaturen eine N-Strippung (Abb. 4.70). Die wesentliche Ursache für diesen Befund dürfte die unterschiedliche pH-Wertentwicklung darstellen (Kap. 4.1.1).

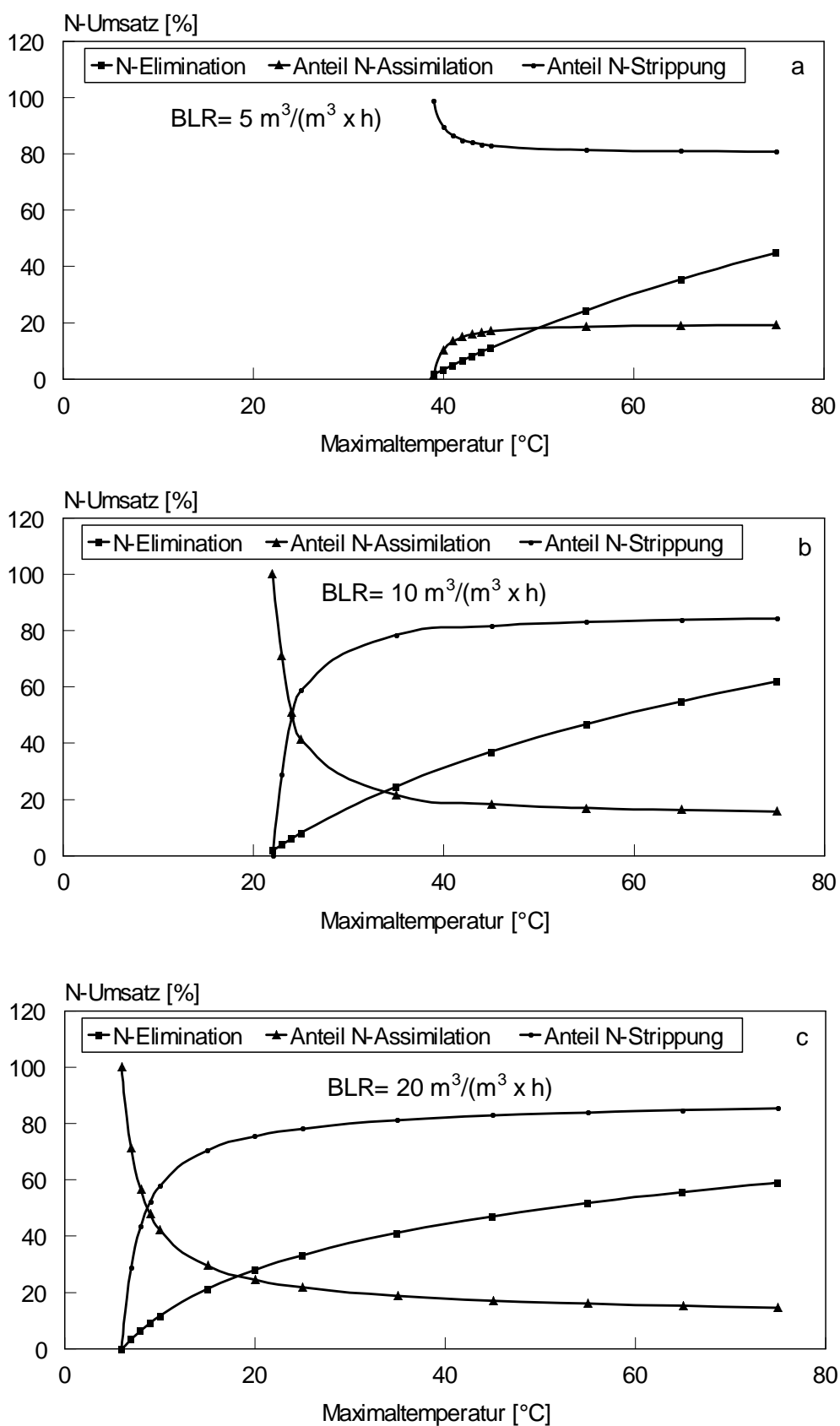


Abb. 4.69 a, b, c: Stickstoffumsatz in separierter Gülle nach 100 h Belüftungszeit in Abhängigkeit von der Maximaltemperatur und der Belüftungsrate

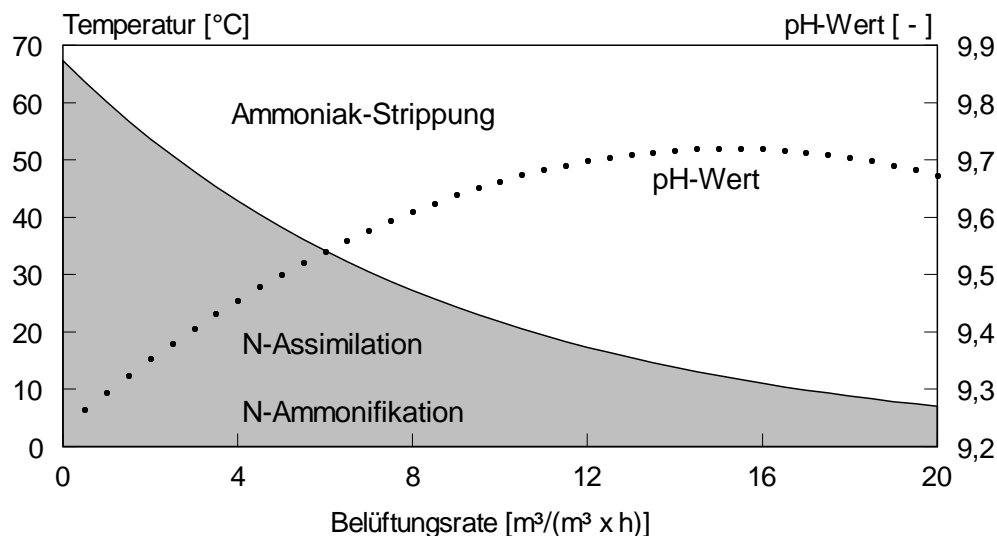


Abb. 4.70: Stickstofffluss in Abhängigkeit von der Belüftungsrate und der Temperatur bei der Belüftung separierter Schweinegülle

#### 4.1.11 Entseuchung

Ein wesentliches Verfahrensziel bei der aerob-thermophilen Güllebehandlung ist die Inaktivierung tier- und humanpathogener Mikroorganismen. Diesbezügliche Untersuchungen wurden vom Institut für Umwelt- und Tierhygiene der Universität Hohenheim bei den Versuchen 58, 67 und 104 durchgeführt (Tab. 4.50 – 4.52). Die bakteriologischen Untersuchungen erstreckten sich auf Gesamtkeimzahl (GKZ), Enterobacteriaceen (EBA), Escherichia coli (E. coli), Fäkalstreptococcen (FKS) und Salmonellen (Sal).

Tab. 4.50: Inaktivierung von pathogenen Mikroorganismen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , Versuch 58

Zeit [h]	GKZ [KBE/ml]	EBA [KBE/ml]	E. coli [KBE/ml]	FKS [KBE/ml]	Sal. [KBE/ml]	pH [-]	T [°C]	NH <sub>4</sub> N [g/kg]	NH <sub>3</sub> N* [g/kg]
0	$6,8 \times 10^5$	$9,5 \times 10^2$	$0,7 \times 10^0$	$9,5 \times 10^3$	n. n.	8,53	23,4	4,99	0,73
16	$2,1 \times 10^5$	n. n.	n. n.	$9,5 \times 10^2$	n. n.	9,01	37,7	4,66	2,71
24	$1,5 \times 10^5$	n. n.	n. n.	$4,5 \times 10^2$	n. n.	9,34	45,2	4,30	3,56
40	$1,2 \times 10^5$	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	9,49	51,5	3,82	3,47
48	$9,8 \times 10^5$	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	9,68	45,7	3,50	3,20
64	$1,1 \times 10^5$	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	9,69	41,7	3,14	2,81

GKZ: Gesamtkeimzahl, EBA: Enterobacteriaceen, E. coli: Escherichia coli, FKS: Fäkalstreptococcen, Sal.: Salmonellen, KBE: Kolonie bildende Einheiten, n. n.= nicht nachweisbar, \*rechnerisch ermittelt nach Anthonisen [61]

Tab. 4.51: Inaktivierung von pathogenen Mikroorganismen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , Versuch 67

Zeit [h]	GKZ [KBE/ml]	EBA [KBE/ml]	E. coli [KBE/ml]	FKS [KBE/ml]	Sal. [KBE/ml]	pH [ - ]	T [°C]	NH <sub>4</sub> N [g/kg]	NH <sub>3</sub> N* [g/kg]
0	n. b.	$9,5 \times 10^3$	$9,5 \times 10^3$	$9,5 \times 10^3$	$2,5 \times 10^{-1}$	7,78	15,6	5,23	0,09
18	n. b.	$1,7 \times 10^{-1}$	$0,2 \times 10^1$	$4,5 \times 10^4$	n. n.	8,79	31,0	4,91	1,71
26	n. b.	n. n.	n. n.	$1,1 \times 10^2$	n. n.	8,97	51,0	4,57	3,41
42	n. b.	n. n.	n. n.	$1,4 \times 10^{-1}$	n. n.	9,48	51,0	3,86	3,49
48	n. b.	n. n.	n. n.	$0,4 \times 10^{-1}$	n. n.	9,51	48,1	3,83	3,43
66	n. b.	n. n.	n. n.	$0,7 \times 10^{-1}$	n. n.	9,51	41,8	3,46	2,95

GKZ: Gesamtkeimzahl, EBA: Enterobacteriaceen, E. coli: Escherichia coli, FKS: Fäkalstreptococcen, Sal.: Salmonellen, KBE: Kolonie bildende Einheiten, n. n.= nicht nachweisbar, \*rechnerisch ermittelt nach Anthonisen [61]

Die Ergebnisse zeigen, dass bei der aerob-thermophilen Belüftung von Gülle Enterobacteriaceen und E. coli innerhalb weniger Stunden bis unter die Nachweisgrenze reduziert werden. Diese signifikante Inaktivierung fand bei allen Versuchen bereits unter mesophilen Bedingungen statt und dürfte damit vor allem auf die Ammoniakkonzentrationen zurückzuführen sein. Ammoniak-Stickstoff wäre demnach bereits bei Konzentrationen von unter 1,71 g/kg (s. Tab. 4.51) für diese Organismen toxisch. Salmonellen wurden ebenfalls innerhalb weniger Versuchsstunden abgetötet, wobei allerdings festzustellen ist, dass sie überhaupt nur in einer Gülleprobe nachgewiesen wurden (V 67). Eine signifikante Inaktivierung von Fäkalstreptococcen innerhalb von 20 h Belüftungszeit wurde unter mesophilen Bedingungen nur bei sehr hohen Ammoniakkonzentrationen erreicht (V 104). Diese Organismen sind gegenüber der Einwirkung von Ammoniak offensichtlich weniger sensitiv. Bei mesophilen Temperaturbedingungen zwischen 15 und 31 °C (V 67) und korrespondierenden Ammoniakstickstoff-Konzentrationen von 0,09 und 1,71 g/kg wurde keine Reduzierung der Fäkalstreptococcen erzielt. Ammoniakstickstoff-Konzentrationen von maximal 2,71 g/kg unter mesophilen Temperaturbedingungen (V 58) führten aber innerhalb von 16 h zu einer 90 % igen Reduktion von Fäkalstreptococcen. Mehr als 96 % der Fäkalstreptococcen wurden bei maximalen Ammoniakstickstoff-Konzentrationen von 4,77 g/kg und mesophilen Bedingungen innerhalb von 19 h Belüftungszeit inaktiviert (V 104). Bei Temperaturen oberhalb von 45 °C und Ammoniakstickstoff-Konzentrationen von 3,56 g/kg fand innerhalb von 16 h eine vollständige Inaktivierung dieser Organismen statt (V 58). Vergleichbare Ergebnisse wurden bei 51 °C innerhalb von 16 h bei Versuch 67 festgestellt. Hiervon abweichend ergaben vergleichbare Versuchsbedingungen bei Versuch 104 keine quantitative Inaktivierung von Fäkalstreptococcen. Eine mögliche Erklärung für diese Ergebnisse könnte in den unterschiedlichen TR-Konzentrationen zu suchen sein. Während bei einer TR-Konzentration von 39,6 g/kg (V 58) eine vollständige Inaktivierung der Fäkalstreptococcen gelang, führten steigende TR-Konzentrationen dazu, dass eine quantitative Abtötung nicht mehr erzielt wurde (V 67, TR= 64,2 g/kg, V 104, TR= 72,4 g/kg). Denkbar ist daher, dass Fäkalstreptococcen innerhalb poröser Feststoffteilchen nicht den hohen Ammoniakkonzentrationen der (äußeren) Flüssigphase ausgesetzt waren und daher in geringem Umfang überlebten. Feststoffe setzen bei ihrer Versäuerung organische Säuren frei (auch in poröse Innenräume), die die Ammoniakkonzentration reduzieren können.

Steigende TR-Konzentrationen ergaben im Mittel auch sinkende pH-Werte in der Gülle (s. Abb. 4.5, S. 35).

Tab. 4.52: Inaktivierung von pathogenen Mikroorganismen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , Versuch 104

Zeit [h]	GKZ [KBE/ml]	EBA [KBE/ml]	E. coli [KBE/ml]	FKS [KBE/ml]	Sal. [KBE/ml]	pH [ - ]	T [°C]	NH <sub>4</sub> N [g/kg]	NH <sub>3</sub> N* [g/kg]
0	$3,2 \times 10^5$	$4,5 \times 10^1$	$2,5 \times 10^1$	$2,0 \times 10^4$	n. n.	7,69	26,3	7,64	0,22
19	$1,2 \times 10^5$	n. n.	n. n.	$0,7 \times 10^3$	n. n.	9,24	34,4	7,36	4,77
23	$1,0 \times 10^5$	n. n.	n. n.	$9,5 \times 10^2$	n. n.	9,16	41,2	7,21	5,13
27	$4,0 \times 10^5$	n. n.	n. n.	$2,0 \times 10^1$	n. n.	9,27	46,2	7,04	5,72
43	$1,1 \times 10^5$	n. n.	n. n.	$9,5 \times 10^1$	n. n.	9,42	55,2	6,25	5,71
47	$4,9 \times 10^4$	n. n.	n. n.	$1,5 \times 10^1$	n. n.	9,54	63,6	5,92	5,67
51	$4,5 \times 10^4$	n. n.	n. n.	$2,5 \times 10^1$	n. n.	9,67	64,2	5,55	5,38
67	$5,7 \times 10^4$	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	9,76	68,2	3,82	3,74
80	$3,6 \times 10^4$	n. n.	n. n.	$9,5 \times 10^0$	n. n.	9,62	68,2	2,49	2,42
96	$2,5 \times 10^4$	n. n.	n. n.	$1,4 \times 10^{-1}$	n. n.	9,68	57,4	1,88	1,80

GKZ: Gesamtkeimzahl, EBA: Enterobacteriaceen, E. coli: Escherichia coli, FKS: Fäkalstreptococcen, Sal.: Salmonellen, KBE: Kolonie bildende Einheiten, n. n.= nicht nachweisbar, \*rechnerisch ermittelt nach Anthonisen [61]

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass eine quantitative Inaktivierung von Enterobacteriaceen, E. coli sowie von Salmonellen bei der aerob-thermophilen Belüftung innerhalb von wenigen Stunden sicher und bereits unter mesophilen Bedingungen erreicht werden kann. Für eine schnelle, 90 % ige Abtötung von Fäkalstreptococcen sind unter mesophilen Bedingungen sehr hohe Ammoniakkonzentrationen (7,3 g/kg) erforderlich. Bei Ammoniakkonzentrationen von etwa 4 g/kg sind zur Erzielung entsprechender Ergebnisse Temperaturen von 45 – 51 °C erforderlich. Hohe TR-Konzentrationen in der Gülle erschweren offensichtlich die quantitative Abtötung von Fäkalstreptococcen. Eine deutliche Reduktion von Fäkalstreptococcen war erst bei Temperaturen von 45 – 52 °C (V 58), bzw. 51 °C (V 67) oder im mesophilen Temperaturbereich bei sehr hohen Ammoniakkonzentrationen (V 104) von mehr als 5,7 g/kg zu beobachten.

## 4.2 Versuche im quasi-kontinuierlichen Betrieb

### 4.2.1 Allgemeiner Fermentationsverlauf

Wie die Ergebnisse zu den bakteriologischen Untersuchungen im batch-Betrieb gezeigt haben, ist zur Inaktivierung von pathogenen Bakterien eine Mindestverweilzeit von 24 h erforderlich. Wird ein voll durchmischter Reaktor im Ausschwemmbetrieb betrieben, besteht in Folge von Kurzschlussströmungen die Gefahr, dass nicht entseuchte Gülle in den Ablauf des Reaktors gelangt und damit ein wesentliches Verfahrensziel nicht erreicht werden kann. Daher wurde die Versuchsanlage quasi-kontinuierlich betrieben. Der tägliche Betriebszyklus begann mit der Absaugung einer über eine Wägung einstellbare Güllemenge (Austrag). Anschließend erfolgte die Wiederauffüllung mit separierter Frischgülle (Zutrag). Die Zyklusdauer betrug 24 h (s. Kap. 3.2.1, S. 21 – 23).

Zur Darstellung der sich bei dieser Betriebsweise ergebenden typischen Kurvenverläufe wird zunächst ein Versuch beschrieben, bei dem die separierte Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  belüftet wurde. Die mittlere hydraulische Verweilzeit betrug 3 d, das tägliche Austauschvolumen 100 l. Die bei diesem Versuch eingesetzte Gülle wies folgende Zusammensetzung auf: TR: 68,2 – 84,6 g/kg, CSB: 105 – 125 g/kg, BSB<sub>5</sub>: 35,9 – 44,1 g/kg, NH<sub>4</sub>N: 7,54 – 7,83 g/kg und N<sub>ges</sub>: 9,5 – 10,5 g/kg.

Bedingt durch die quasikontinuierliche Betriebsweise zeigte der Temperaturverlauf eine typische Sägezahnkurve (Abb. 4.71). Die höchsten Gülletemperaturen wurden im Regelfall unmittelbar vor der Wiederauffüllung (Phase 1) erzielt. Mit der Wiederauffüllung mit Frischgülle, die bei Hallentemperatur (10 - 20 °C) gelagert wurde, trat eine starke Abkühlung auf. Nach Abschluß der Wiederauffüllung setzte die Selbsterhitzung im Regelfall sofort ein und führte zu einem starken Wiederanstieg der Gülletemperatur (Phase 2).

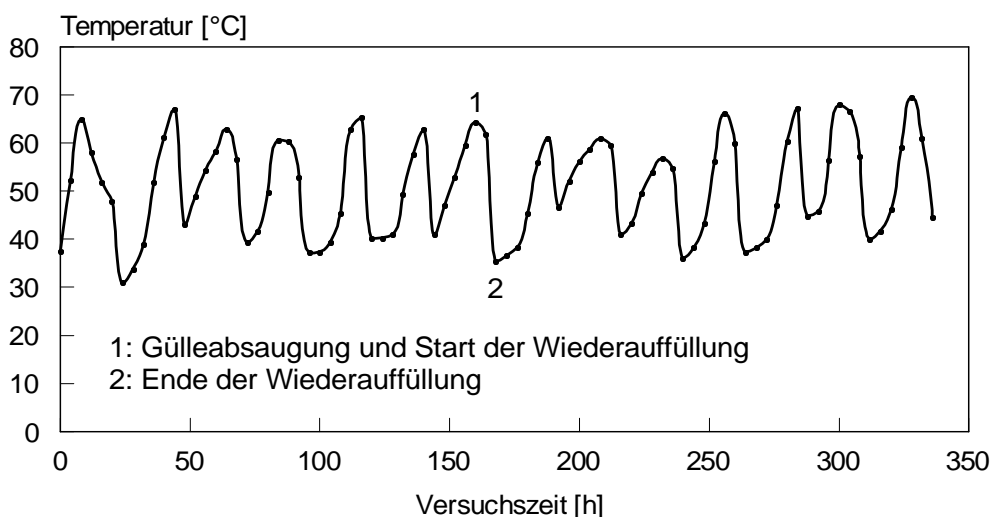


Abb. 4.71: Temperaturverlauf bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  im quasikontinuierlichen Betrieb

Bedingt durch die in Kap. 4.1 dargestellten Prozesse wurde auch im quasikontinuierlichen Betrieb eine deutliche Erhöhung des pH-Wertes in der Gülle gemessen (Abb. 4.72). Das hohe Puffervermögen der Gülle führte zu sehr konstanten Messergebnissen.

Die TR-Elimination wies bei Zutragskonzentrationen von 68,2 bis 84,6 g/kg starke Schwankungen auf (Abb. 4.73). Sie bewegte sich zwischen 3,6 und 20,7 % und lag im Mittel bei 14,1 %. Die bei der Analyse auftretende Verdampfung von Ammoniak wurde bei der Berechnung berücksichtigt (s. Kap. 4.1.4). Eine mögliche Ursache für die Schwankungen der TR-Elimination ist in Entmischungsvorgängen zu sehen. Ferner ist durch den pH-Wertanstieg mit einer Ausfällung verschiedener Salze (Sulfate, Phosphate, Carbonate) zu rechnen, die ebenfalls zu einer Entmischung beitragen könnten.

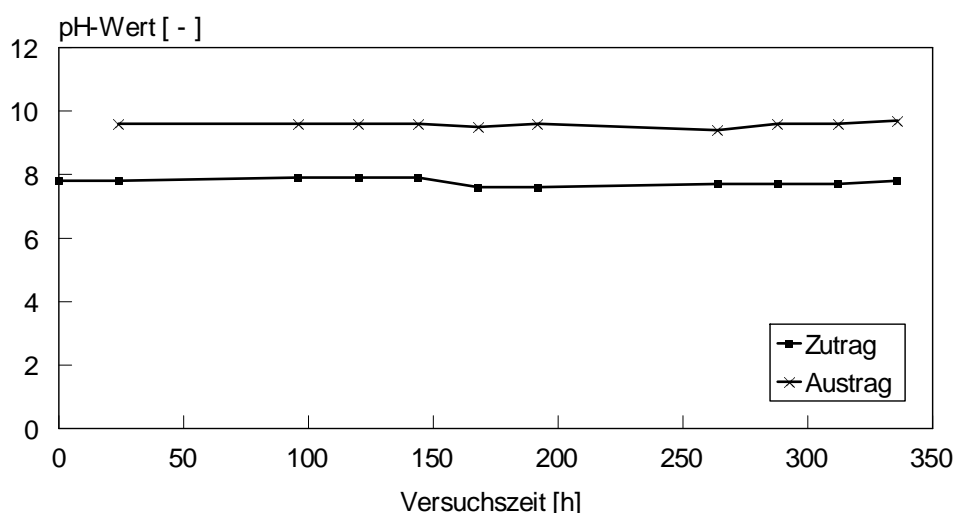


Abb. 4.72: pH - Wertverlauf bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  im quasikontinuierlichen Betrieb

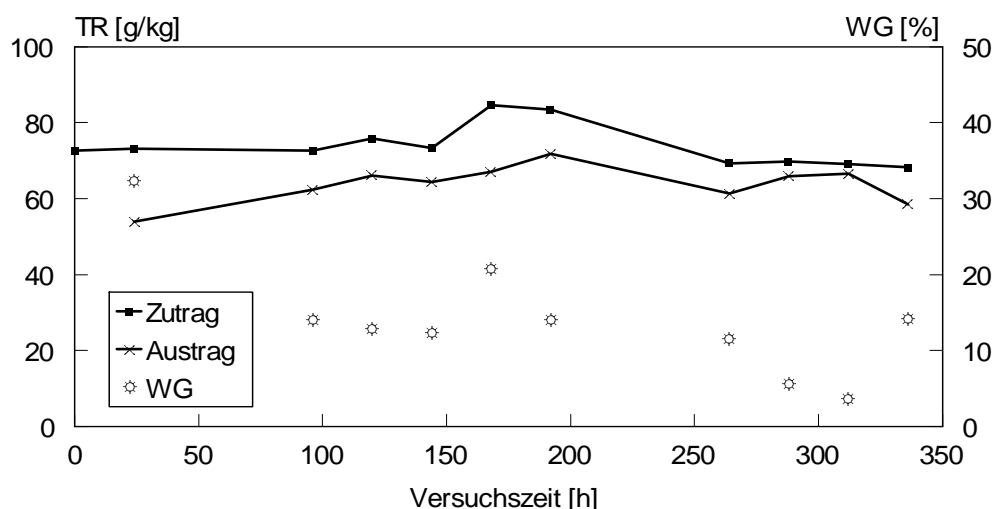


Abb. 4.73: Verlauf der TR-Konzentrationen und Wirkungsgrad (WG) der TR-Elimination bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  im quasikontinuierlichen Betrieb

Bei CSB-Konzentrationen von 105 bis 125 g/kg wurde ein CSB-Abbau von 37 bis 53 % gemessen (Abb. 4.74). Im Mittel betrug er 42,3 %. Im Gegensatz zu den Verhältnissen bei der TR-Elimination war der Wirkungsgrad vergleichsweise konstant. Der Wirkungsgrad des

BSB<sub>5</sub>-Abbaus zeigte mit 84 bis 88 % nur sehr geringe Schwankungen und betrug im Mittel 86 % (Abb. 4.75). Bei hohen Zutragskonzentrationen von 35,9 bis 44,1 g/kg wurden BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen von 4,4 bis 6,4 g/kg im Austrag gemessen. Bei den organischen Säuren, auf dessen graphische Darstellung verzichtet wird, wurden generell Wirkungsgrade > 97 % erreicht. Essigsäure, dessen Konzentrationen im Zutrag zwischen 10,2 und 12,1 g/kg lagen, wurde mit einem Wirkungsgrad von 97,3 bis 98,8 % abgebaut. Propionsäure-Konzentrationen von 2,23 bis 3,72 g/kg im Zutrag wurden quantitativ oxidiert. Eine ebenfalls quantitative Oxidation wurde bei Iso-Buttersäure (0,6 – 1,04 g/kg im Zutrag), Buttersäure (1,4 – 2,26 g/kg im Zutrag) und Iso-Valeriansäure (0,78 – 1,43 g/kg im Zutrag) erzielt. Valeriansäure und Capronsäure wurden bei diesem Versuch nicht nachgewiesen.

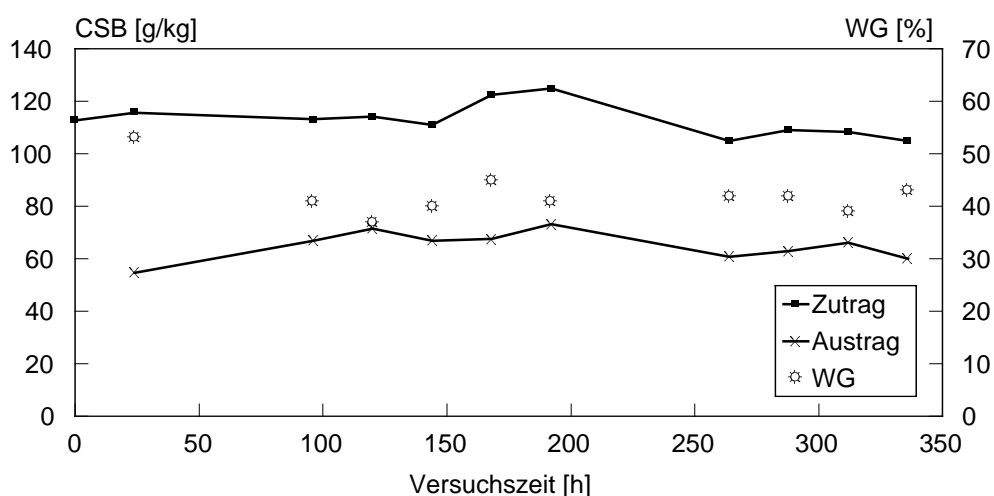


Abb. 4.74: Verlauf der CSB-Konzentrationen und Wirkungsgrad (WG) des CSB-Abbaus bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  im quasikontinuierlichen Betrieb

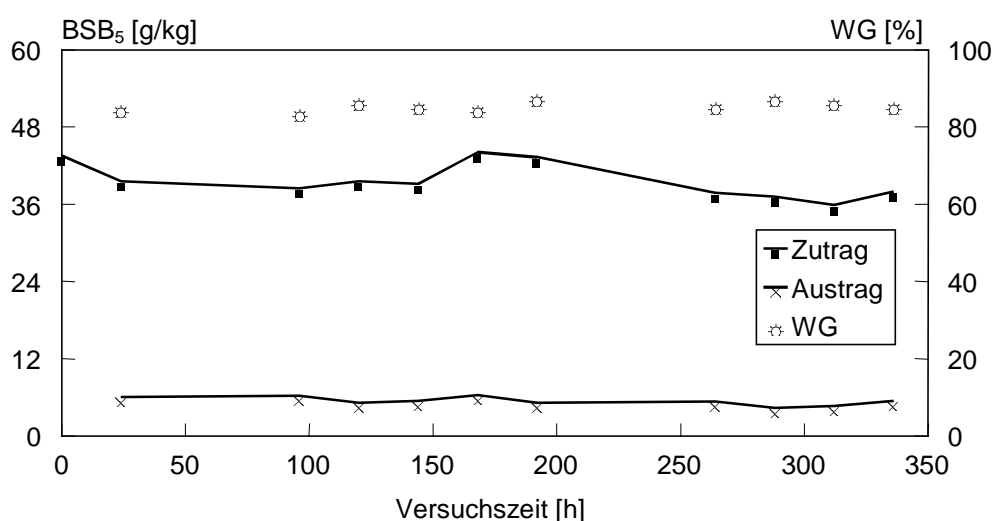


Abb. 4.75: Verlauf der BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen und Wirkungsgrad (WG) des BSB<sub>5</sub>-Abbaus bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  im quasikontinuierlichen Betrieb



Bei einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  und Zutragskonzentrationen von 7,54 bis 7,83 g/kg  $\text{NH}_4\text{N}$  wurden  $\text{NH}_4\text{N}$ -Eliminationsgrade von 63,7 bis 72,2 % erzielt (Abb. 4.76). Im Mittel lag er bei 67,3 %. Die  $\text{NH}_4\text{N}$ -Konzentration im Austrag schwankten zwischen 2,1 und 2,84 g/kg und lag im Mittel bei 2,5 g/kg.

Die Nges-Elimination, die aufgrund der mikrobiellen Stickstoff-Assimilation generell geringer ausfällt als die  $\text{NH}_4\text{N}$ -Elimination, bewegte sich zwischen 41,6 und 48,7 % (Abb. 4.77) und lag im Mittel bei 44,8 %. Die Zutragskonzentrationen bewegten sich zwischen 9,5 und 10,5 g/kg, im Austrag wurden Konzentrationen von 4,9 bis 5,9 g/kg gemessen.

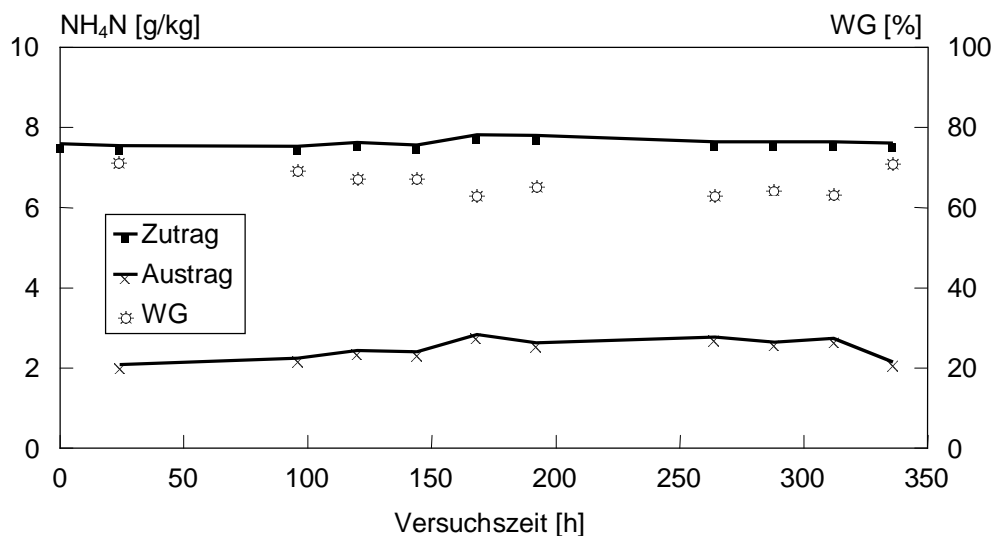


Abb. 4.76: Verlauf der  $\text{NH}_4\text{N}$ -Konzentrationen und Wirkungsgrad der  $\text{NH}_4\text{N}$ -Elimination bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  im quasikontinuierlichen Betrieb

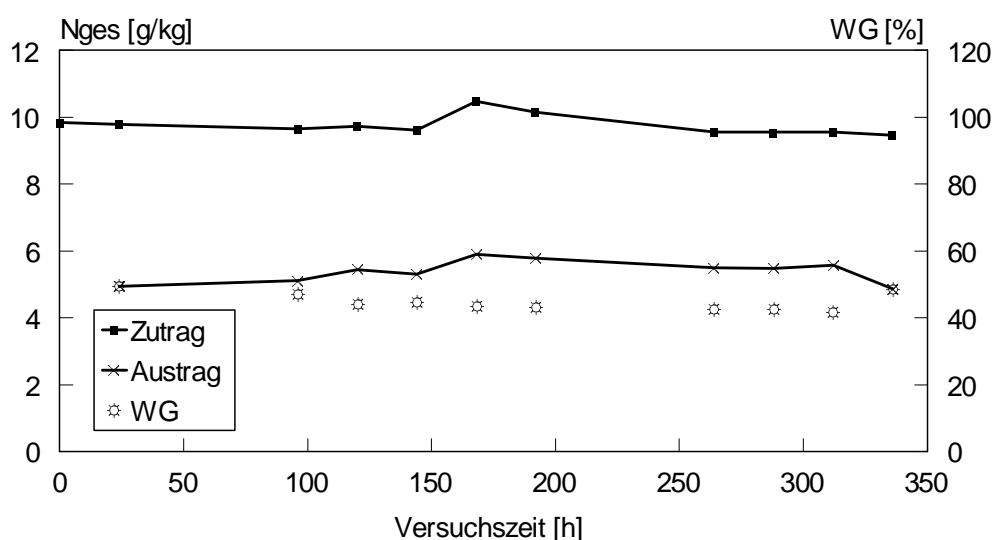


Abb. 4.77: Verlauf der Nges-Konzentrationen und Wirkungsgrad der Nges-Elimination bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  im quasikontinuierlichen Betrieb

#### 4.2.2 Quasi-kontinuierliche Versuche mit einer Belüftungsrate von $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

Quasi-kontinuierliche Versuche mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  wurden bei unterschiedlichen, mittleren hydraulischen Verweilzeiten (MHV) durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war es festzustellen,

- welchen Einfluss die hydraulische Verweilzeit auf den Kohlenstoffumsatz und die N-Elimination hat und
- bei welchen hydraulischen Verweilzeiten in Hinblick auf den Kohlenstoffabbau und die N-Elimination optimale Ergebnisse erreicht werden können.

Zu diesem Zweck wurden die Zutrags- und Austragsproben täglich analysiert und die jeweiligen Wirkungsgrade berechnet. Aus der Gesamtzahl der Tageswirkungsgrade erfolgte die Berechnung der minimalen, maximalen und mittleren Wirkungsgrade.

Bei einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  und einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von einem Tag wurde bereits ein weitgehender Abbau des  $\text{BSB}_5$  sowie der organischen Säuren beobachtet (Tab. 4.53). Es ist hierbei jedoch zu berücksichtigen, dass die Konzentrationen dieser Komponenten in der Gülle bei diesem Versuch im unteren Bereich lagen. Unter diesen Bedingungen wurden Maximaltemperaturen von  $48 - 51,3 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $49,8 \text{ }^\circ\text{C}$  im Mittel) erzielt.

Die TR- und CSB-Elimination fiel mit durchschnittlich 6,3 und 20,3 % erwartungsgemäß gering aus. Dies liegt im wesentlichen an der Tatsache, dass nur ein kleiner Anteil der in der Gülle enthaltenen Kohlenstoffquellen kurzfristig oxidiert werden können und damit als leicht abbaubar einzustufen sind. Die Elimination von  $\text{NH}_4\text{N}$  und Gesamtstickstoff war mit durchschnittlich 18,6 bzw. 12,3 % gering.

Die Erhöhung der mittleren hydraulischen Verweilzeit auf zwei Tage (Tab. 4.54 und 4.55) führte im wesentlichen zu einer Steigerung der N-Elimination und im geringeren Umfang zu einer Verbesserung des Kohlenstoffabbaus. Dies wird bei Betrachtung der Versuche 62 (Tab. 4.55) und 71 (Tab. 4.54) deutlich. Bei letzterem lagen die Konzentrationen an  $\text{BSB}_5$  und organischen Säuren erheblich über denen von Versuch 62. Dementsprechend lagen die maximalen Gülletemperaturen mit  $56,5 - 61 \text{ }^\circ\text{C}$  bei Versuch 71 deutlich über denen von Versuch 62 ( $44,7 - 52,7 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Trotzdem wurden vergleichbare Wirkungsgrade erzielt. Die Elimination von  $\text{NH}_4\text{N}$  wurde bei vergleichbaren Zutrags-Konzentrationen gegenüber Versuch 64 (MHV= 1d) um knapp 50 % (von 18,6 % auf 27,7 % im Mittel der Versuche 62 und 71) verbessert. Demgegenüber ergab sich mit 23 % nur eine geringfügig erhöhte Gesamtstickstoff-Elimination (von 12,3 auf 15,1 % im Mittel der Versuche 62 und 71).

Tab. 4.53: Kohlenstoffstoffabbau und Stickstoff-Elimination bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von einem Tag bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

Versuchs – Nr. : 64				
Versuchsbedingungen:				
Belüftungsrate (BLR)= $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , Mittlere hydraulische Verweilzeit (MHV): 1 Tag				
Versuchszeit: 144 h				
Parameter		Mittel	Minimum	Maximum
TR	Zutrag [g/kg]	52,6	48,1	57,6
	Austrag [g/kg]	49,1	47,1	50,7
	WG [%]	6,3	2,1	12,0
CSB	Zutrag [g/kg]	54,5	50,9	60,5
	Austrag [g/kg]	43,3	41,4	47,3
	WG [%]	20,3	15,1	30,3
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	9,1	7,7	11,1
	Austrag [g/kg]	2,5	1,8	3,5
	WG [%]	70,8	62,3	80,2
Essigsäure	Zutrag [g/kg]	2,53	2,34	2,91
	Austrag [g/kg]	0,22	0,00	0,32
	WG [%]	90,8	87,3	100,0
Propionsäure	Zutrag [g/kg]	1,63	1,41	1,89
	Austrag [g/kg]	0,10	0,00	0,17
	WG [%]	93,5	91,0	100,0
Iso-Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,17	0,15	0,20
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,05	0,03	0,08
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Iso-Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,22	0,19	0,25
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,04	0,03	0,06
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	4,70	4,58	4,81
	Austrag [g/kg]	3,83	3,33	4,18
	WG [%]	18,6	11,3	27,3
Nges	Zutrag [g/kg]	5,90	5,67	6,16
	Austrag [g/kg]	5,18	4,71	5,52
	WG [%]	12,3	7,1	16,9

Tab. 4.54: Kohlenstoffstoffabbau und Stickstoff-Elimination bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von zwei Tagen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , Versuch 71

Versuchs – Nr. : 71				
Versuchsbedingungen:				
Belüftungsrate (BLR)= $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , Mittlere hydraulische Verweilzeit (MHV): 2 Tage				
Versuchszeit: 168 h				
Parameter		Mittel	Minimum	Maximum
TR	Zutrag [g/kg]	56,6	51,8	63,5
	Austrag [g/kg]	52,9	50,5	57,2
	WG [%]	6,3	2,5	9,9
CSB	Zutrag [g/kg]	66,2	61,4	72,6
	Austrag [g/kg]	47,5	45,0	51,9
	WG [%]	28,1	26,0	31,4
BSB <sub>5</sub> *	Zutrag [g/kg]	18,0		
	Austrag [g/kg]	5,7		
	WG [%]	68,3		
Essigsäure	Zutrag [g/kg]	4,71	4,20	5,14
	Austrag [g/kg]	0,04	0,00	0,06
	WG [%]	99,1	98,7	100,0
Propionsäure	Zutrag [g/kg]	2,39	2,29	2,56
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Iso-Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,36	0,34	0,38
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,30	0,19	0,36
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Iso-Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,35	0,32	0,36
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,12	0,11	0,13
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	4,79	4,63	5,27
	Austrag [g/kg]	3,42	3,25	3,59
	WG [%]	28,4	24,8	31,9
Nges	Zutrag [g/kg]	5,96	5,75	6,06
	Austrag [g/kg]	5,26	5,00	5,50
	WG [%]	11,8	7,4	16,3

\*= nur ein Messwert

Tab. 4.55: Kohlenstoffstoffabbau und Stickstoff-Elimination bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von zwei Tagen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h), Versuch 62

Versuchs – Nr. : 62				
Versuchsbedingungen:				
Belüftungsrate (BLR)= 10 m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·h), Mittlere hydraulische Verweilzeit (MHV): 2 Tage				
Versuchszeit: 216 h				
Parameter		Mittel	Minimum	Maximum
TR	Zutrag [g/kg]	51,2	48,0	55,4
	Austrag [g/kg]	50,2	46,4	54,9
	WG [%]	1,5	- 9,7	15,0
CSB	Zutrag [g/kg]	49,4	44,6	52,7
	Austrag [g/kg]	42,1	37,6	47,2
	WG [%]	14,3	- 0,2	24,7
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	9,3	7,6	11,2
	Austrag [g/kg]	4,0	2,8	5,0
	WG [%]	56,2	47,4	72,6
Essigsäure	Zutrag [g/kg]	1,30	1,07	1,54
	Austrag [g/kg]	0,22	0,19	0,24
	WG [%]	82,7	78,2	85,7
Propionsäure	Zutrag [g/kg]	1,54	1,33	1,81
	Austrag [g/kg]	0,20	0,14	0,32
	WG [%]	86,8	81,3	90,2
Iso-Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,08	0,07	0,11
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Buttersäure	Zutrag [g/kg]	n. n.	n. n.	n. n.
	Austrag [g/kg]	n. n.	n. n.	n. n.
	WG [%]	n. n.	n. n.	n. n.
Iso-Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,23	0,19	0,28
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	n. n.	n. n.	n. n.
	Austrag [g/kg]	n. n.	n. n.	n. n.
	WG [%]	n. n.	n. n.	n. n.
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	4,99	4,94	5,03
	Austrag [g/kg]	3,64	3,30	4,08
	WG [%]	27,0	18,6	34,1
Nges	Zutrag [g/kg]	6,20	6,05	6,31
	Austrag [g/kg]	5,06	4,62	5,44
	WG [%]	18,3	13,7	26,8

Tab. 4.56: Kohlenstoffstoffabbau und Stickstoff-Elimination bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von drei Tagen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , Versuch 70

Versuchs – Nr. : 70				
Versuchsbedingungen:				
Belüftungsrate (BLR)= $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , Mittlere hydraulische Verweilzeit (MHV): 3 Tage				
Versuchszeit: 240 h				
Parameter		Mittel	Minimum	Maximum
TR	Zutrag [g/kg]	60,7	56,2	67,8
	Austrag [g/kg]	55,0	52,2	60,4
	WG [%]	10,1	4,4	21,5
CSB	Zutrag [g/kg]	67,4	60,9	75,0
	Austrag [g/kg]	49,6	45,6	57,3
	WG [%]	26,2	17,4	36,0
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	17,8	16,0	18,7
	Austrag [g/kg]	3,4	2,2	5,3
	WG [%]	81,1	71,7	88,2
Essigsäure	Zutrag [g/kg]	4,57	4,12	4,79
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Propionsäure	Zutrag [g/kg]	2,39	2,28	2,50
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Iso-Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,38	0,35	0,41
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,21	0,20	0,22
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Iso-Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,38	0,35	0,41
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,14	0,12	0,16
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	5,21	5,13	5,32
	Austrag [g/kg]	3,46	3,32	3,66
	WG [%]	33,6	30,7	37,0
Nges	Zutrag [g/kg]	6,69	6,53	6,82
	Austrag [g/kg]	5,34	5,06	5,61
	WG [%]	20,2	17,0	24,9

Tab. 4.57: Kohlenstoffstoffabbau und Stickstoff-Elimination bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von drei Tagen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , Versuch 107

Versuchs - Nr.: 107				
Versuchsbedingungen:				
Belüftungsrate (BLR)= $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , Mittlere hydraulische Verweilzeit (MHV): 3 Tage				
Versuchszeit: 768 h				
Parameter		Mittel	Minimum	Maximum
TR	Zutrag [g/kg]	75,1	71,9	81,7
	Austrag [g/kg]	66,4	58,4	76,4
	WG [%]	11,5	1,5	26,3
CSB	Zutrag [g/kg]	112,6	106,1	121,8
	Austrag [g/kg]	74,6	57,5	98,5
	WG [%]	33,8	16,7	47,5
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	38,4	36,6	41,3
	Austrag [g/kg]	10,2	5,0	15,1
	WG [%]	73,3	58,7	86,8
Essigsäure	Zutrag [g/kg]	9,70	4,71	13,20
	Austrag [g/kg]	3,60	0,75	9,91
	WG [%]	62,8	19,6	99,2
Propionsäure	Zutrag [g/kg]	2,80	1,09	4,07
	Austrag [g/kg]	0,16	0,0	0,50
	WG [%]	93,6	67,9	100,0
Iso-Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,84	0,37	1,22
	Austrag [g/kg]	0,07	0,00	0,37
	WG [%]	84,4	11,9	100,0
Buttersäure	Zutrag [g/kg]	1,88	0,82	2,66
	Austrag [g/kg]	0,08	0,00	0,52
	WG [%]	92,4	51,4	100,0
Iso-Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,99	0,52	1,39
	Austrag [g/kg]	0,20	0,00	0,62
	WG [%]	65,5	- 10,7	100,0
Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,20	0,12	0,31
	Austrag [g/kg]	0,05	0,00	0,26
	WG [%]	81,5	3,70	100,0
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	7,47	6,60	7,77
	Austrag [g/kg]	4,32	3,14	5,68
	WG [%]	42,1	24,0	58,3
Nges	Zutrag [g/kg]	9,70	8,83	10,08
	Austrag [g/kg]	6,92	5,84	8,41
	WG [%]	28,6	15,6	40,0

Hydraulische Verweilzeiten von drei Tagen führten auch bei sehr hohen BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen zu einem weitgehenden, aber nicht mehr quantitativen Abbau (Versuch 107, Tab. 4.57). Gleiches gilt auch für die organischen Säuren. Demzufolge könnten bei diesen Konzentrationen an BSB<sub>5</sub> und organischen Säuren bei kürzeren hydraulischen Verweilzeiten keine befriedigenden Wirkungsgrade mehr erzielt werden. Den hohen BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen von 38,4 g/kg entsprechend, wurden bei Versuch 107 Maximaltemperaturen von 59,9 – 68,5 °C erreicht, bei Versuch 70 mit BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen von 17,8 g/kg 50,6 – 55,6 °C.

Die TR- und CSB-Elimination lag mit durchschnittlich 10,8 bzw. 30 % zwar deutlich über der, die bei hydraulischen Verweilzeiten von einem und zwei Tagen gemessen wurde, fiel aber insgesamt gering aus.

Mit durchschnittlich 37 % wurde die NH<sub>4</sub>N-Elimination nochmals deutlich verbessert (von 27,7 % bei einer MHV von 2 Tagen auf 37,9 % bei einer MHV von 3 Tagen). Gleiches gilt auch für die Elimination von Gesamtstickstoff, die von 15,1 % auf durchschnittlich 24,4 % gesteigert wurde, was einem Anstieg von 62 % entspricht. In diesem Zusammenhang sind jedoch die unterschiedlichen N-Konzentrationen im Zutrag zu berücksichtigen. Werden Versuche gleicher NH<sub>4</sub>N-Konzentrationen verglichen (V 62, Tab. 4.55 und V 70, Tab. 4.56), wurde die NH<sub>4</sub>N-Elimination lediglich um 24 % (von 27 % auf 33,6 %) und die Elimination von Gesamtstickstoff um 10 % (von 18,3 % auf 20,2 %) gesteigert.

Hydraulische Verweilzeiten von 4 Tagen erbrachten – abgesehen von der TR- und CSB-Elimination - keine erhebliche Verbesserung der erzielten Wirkungsgrade für die einzelnen Parameter, sofern Versuche mit vergleichbaren Konzentrationen verglichen werden (V 70 und V 69, Tab. 4.56 und 4.58).

Die um durchschnittlich 24 % verbesserte TR-Elimination (von 10,1 auf 12,5 %) sowie die um 18 % gesteigerte CSB-Elimination (von 26,2 auf 31,0 %) ist möglicherweise auf den Abbau schwerer abbaubarer Kohlenstoffquellen zurückzuführen. Da die täglich bestimmten Wirkungsgrade bei beiden Parametern jedoch erheblichen Schwankungen unterlagen, lassen sich diesbezüglich keine gesicherten Aussagen machen.

Der BSB<sub>5</sub>-Abbau sowie der Abbau organischer Säuren zeigte keine Unterschiede. Beim BSB<sub>5</sub> wurden Abbaugrade von 81 – 83 % gemessen, der Abbau organischer Säuren war quantitativ. Deutlich erkennbar war der Einfluss der BSB<sub>5</sub>-Konzentration auf die erzielten Maximaltemperaturen. Bei Versuch 69 (BSB<sub>5</sub> im Zutrag: 20,4 g/kg) lagen sie bei 47,9 – 57,6 °C, während sie bei Versuch 66 (BSB<sub>5</sub>: 9,5 g/kg) zwischen 41 und 45 °C und bei Versuch 63 (BSB<sub>5</sub>: 12,4 g/kg) zwischen 44,7 und 52,7 °C schwankten.

Die Elimination von NH<sub>4</sub>N stieg von durchschnittlich 33,6 % (V 70) auf 34,8 % (V 69) und die Gesamtstickstoff-Elimination von 20,2 auf 22,2 %. Bei den Versuchen 66 und 63 lag sowohl die NH<sub>4</sub>N- als auch die Gesamtstickstoffelimination deutlich unter derjenigen von Versuch 69.



Tab. 4.58: Kohlenstoffstoffabbau und Stickstoff-Elimination bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von vier Tagen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , Versuch 69

Versuchs – Nr. : 69				
Versuchsbedingungen:				
Belüftungsrate (BLR)= $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , Mittlere hydraulische Verweilzeit (MHV): 4 Tage				
Versuchszeit: 264 h				
Parameter		Mittel	Minimum	Maximum
TR	Zutrag [g/kg]	63,9	60,7	65,8
	Austrag [g/kg]	56,1	52,5	60,8
	WG [%]	12,5	1,1	20,0
CSB	Zutrag [g/kg]	72,7	67,1	77,5
	Austrag [g/kg]	50,3	46,3	56,0
	WG [%]	31,0	27,7	35,3
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	20,4	17,2	23,5
	Austrag [g/kg]	3,3	2,3	5,4
	WG [%]	83,2	72,6	90,2
Essigsäure	Zutrag [g/kg]	4,76	4,47	5,03
	Austrag [g/kg]	0,02	0,00	0,19
	WG [%]	99,6	96,2	100,0
Propionsäure	Zutrag [g/kg]	2,40	2,22	2,49
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Iso-Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,37	0,36	0,39
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,23	0,21	0,25
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Iso-Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,37	0,36	0,38
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,14	0,13	0,15
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	5,21	5,02	5,26
	Austrag [g/kg]	3,39	3,23	3,67
	WG [%]	34,8	30,2	38,5
Nges	Zutrag [g/kg]	6,71	6,39	6,90
	Austrag [g/kg]	5,22	4,70	5,56
	WG [%]	22,2	18,6	31,5

n. n. = nicht nachweisbar

Tab. 4.59: Kohlenstoffstoffabbau und Stickstoff-Elimination bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von vier Tagen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , Versuch 66

Versuchs – Nr. : 66				
Versuchsbedingungen:				
Belüftungsrate (BLR)= $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , Mittlere hydraulische Verweilzeit (MHV): 4 Tage				
Versuchszeit: 216 h				
Parameter		Mittel	Minimum	Maximum
TR	Zutrag [g/kg]	47,1	46,4	47,7
	Austrag [g/kg]	41,1	37,0	44,2
	WG [%]	12,8	5,8	22,1
CSB	Zutrag [g/kg]	45,0	41,8	49,3
	Austrag [g/kg]	34,8	30,2	38,8
	WG [%]	22,3	11,8	30,0
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	9,5	9,4	9,7
	Austrag [g/kg]	1,3	1,2	1,4
	WG [%]	86,2	85,1	87,4
Essigsäure	Zutrag [g/kg]	1,07	0,64	1,44
	Austrag [g/kg]	0,13	0,07	0,25
	WG [%]	86,1	67,2	94,8
Propionsäure	Zutrag [g/kg]	1,64	0,86	2,33
	Austrag [g/kg]	0,06	0,00	0,17
	WG [%]	96,3	92,0	100,0
Iso-Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,14	0,14	0,15
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Buttersäure	Zutrag [g/kg]	n. n.	n. n.	n. n.
	Austrag [g/kg]	n. n.	n. n.	n. n.
	WG [%]	n. n.	n. n.	n. n.
Iso-Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,15	0,08	0,18
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	n. n.	n. n.	n. n.
	Austrag [g/kg]	n. n.	n. n.	n. n.
	WG [%]	n. n.	n. n.	n. n.
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	4,59	4,55	4,62
	Austrag [g/kg]	3,17	2,75	3,65
	WG [%]	28,4	15,3	40,1
Nges	Zutrag [g/kg]	5,66	5,50	5,79
	Austrag [g/kg]	4,49	3,93	5,17
	WG [%]	20,7	6,0	32,1

n. n. = nicht nachweisbar

Tab. 4.60: Kohlenstoffstoffabbau und Stickstoff-Elimination bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von vier Tagen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h), Versuch 63

Versuchs – Nr. : 63				
Versuchsbedingungen:				
Belüftungsrate (BLR)= 10 m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·h), Mittlere hydraulische Verweilzeit (MHV): 4 Tage				
Versuchszeit: 168 h				
Parameter		Mittel	Minimum	Maximum
TR	Zutrag [g/kg]	50,9	43,3	56,2
	Austrag [g/kg]	47,4	42,8	51,0
	WG [%]	10,4	0,4	20,7
CSB	Zutrag [g/kg]	52,3	47,1	57,9
	Austrag [g/kg]	40,5	36,0	43,6
	WG [%]	24,9	14,8	31,4
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	12,4	11,8	13,0
	Austrag [g/kg]	2,0	1,8	2,5
	WG [%]	84,0	80,8	86,1
Essigsäure	Zutrag [g/kg]	2,90	2,55	3,42
	Austrag [g/kg]	0,23	0,17	0,26
	WG [%]	91,7	90,6	93,3
Propionsäure	Zutrag [g/kg]	1,69	1,58	1,88
	Austrag [g/kg]	0,08	0,06	0,09
	WG [%]	95,3	94,5	96,4
Iso-Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,19	0,17	0,22
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,06	0,04	0,09
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Iso-Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,24	0,21	0,28
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,05	0,04	0,07
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	4,87	4,66	4,99
	Austrag [g/kg]	3,79	3,59	4,11
	WG [%]	23,1	17,6	27,0
Nges	Zutrag [g/kg]	5,79	5,57	5,87
	Austrag [g/kg]	4,76	4,11	5,18
	WG [%]	18,4	11,8	29,1

#### 4.2.3 Quasi-kontinuierliche Versuche mit einer Belüftungsrate von 15 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

Mit einer Belüftungsrate von 15 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) wurden Versuche bei mittleren hydraulischen Verweilzeiten von 3, 4 und 5 Tagen durchgeführt (Tab. 4.61 – 4.63). Aufgrund der geringen Konzentrationen organischer Säuren in der verwendeten Gülle, die bei allen hydraulischen Verweilzeiten quantitativ abgebaut wurden, wurde auf eine entsprechende Darstellung verzichtet. Da auch die TR-, CSB- und BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen vergleichsweise gering waren, konnte ein Einfluss der hydraulischen Verweilzeit auf die erreichbaren Abbaugrade praktisch nicht bestimmt werden. Die Maximaltemperaturen schwankten zwischen 41,7 und 50,2 °C (V 88), 43 – 47,2 °C (V 91) bzw. 43,7 – 47,9 °C (V 90). Die mittlere TR-Elimination lag bei 10,3 % (MHV= 3d), 8,4 % (MHV= 4 d) bzw. 11,6 % (MHV= 5 d). Der durchschnittliche CSB-Abbaugrad bewegte sich zwischen 24 und 27 %, der BSB<sub>5</sub>-Abbaugrad zwischen 72 und 76 %.

Tab. 4.61: Kohlenstoffstoffabbau und Stickstoff-Elimination bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von drei Tagen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 15 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h), Versuch 88

Versuchs – Nr. : 88				
Versuchsbedingungen:				
Belüftungsrate (BLR)= 15 m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·h), Mittlere hydraulische Verweilzeit (MHV): 3 Tage				
Versuchszeit: 480 h				
Parameter		Mittel	Minimum	Maximum
TR	Zutrag [g/kg]	51,9	45,0	54,2
	Austrag [g/kg]	46,9	42,7	49,7
	WG [%]	10,3	5,1	17,2
CSB	Zutrag [g/kg]	56,2	43,1	61,5
	Austrag [g/kg]	43,3	35,6	46,7
	WG [%]	24,7	17,4	28,8
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	14,1	11,9	16,4
	Austrag [g/kg]	3,3	2,3	4,1
	WG [%]	76,4	71,1	81,0
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	5,14	4,33	5,38
	Austrag [g/kg]	2,41	2,20	2,53
	WG [%]	53,4	47,6	58,7
Nges	Zutrag [g/kg]	6,53	5,38	6,84
	Austrag [g/kg]	4,18	3,74	4,36
	WG [%]	36,5	30,5	40,7

Tab. 4.62: Kohlenstoffstoffabbau und Stickstoff-Elimination bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von vier Tagen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $15 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ , Versuch 91

Versuchs – Nr. : 91				
Versuchsbedingungen:				
Belüftungsrate (BLR)= $15 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ , Mittlere hydraulische Verweilzeit (MHV): 4 Tage				
Versuchszeit: 336 h				
Parameter		Mittel	Minimum	Maximum
TR	Zutrag [g/kg]	45,1	43,2	48,2
	Austrag [g/kg]	41,2	39,3	42,7
	WG [%]	8,4	3,2	18,5
CSB	Zutrag [g/kg]	44,4	42,0	48,0
	Austrag [g/kg]	32,2	30,6	33,5
	WG [%]	27,1	20,2	36,3
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	7,7	6,9	8,3
	Austrag [g/kg]	2,1	1,7	2,9
	WG [%]	72,7	63,8	79,5
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	4,34	4,10	4,42
	Austrag [g/kg]	1,82	1,69	1,92
	WG [%]	58,1	56,5	59,2
Nges	Zutrag [g/kg]	5,41	4,85	5,59
	Austrag [g/kg]	3,12	2,97	3,30
	WG [%]	42,2	38,8	44,1

In Hinblick auf die NH<sub>4</sub>N-Elimination wird der Einfluss der hydraulischen Verweilzeit bei diesen Versuchen jedoch sehr deutlich. Bei vergleichbaren Zutrags-Konzentrationen von 4,3 bis 5,1 g/kg wurden bei einer MHV von 3 Tagen 53,4 %, bei einer MHV von 4 Tagen 58,1 % und bei einer MHV von 5 Tagen 60,5 % des Ammonium-Stickstoffs eliminiert. Hinsichtlich der Elimination von Gesamtstickstoff lagen die entsprechenden Ergebnisse bei 36,5, 42,2 und 43,9 % (Tab. 4.61 – 4.63).

Werden nun Versuche mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  und NH<sub>4</sub>N-Konzentrationen von 4,6 bis 5,2 g/kg und Versuche mit einer Belüftungsrate von  $15 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  und ähnlichen NH<sub>4</sub>N-Konzentrationen verglichen, zeigt sich die Bedeutung der Belüftungsrate auf die N-Elimination. Bei einer hydraulischen Verweilzeit von 3 Tagen und einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  wurden durchschnittlich 33,6 % des NH<sub>4</sub>N und 20,2 % des Gesamtstickstoffs eliminiert (V 70). Bei gleicher hydraulischer Verweilzeit ergab eine Belüftungsrate von  $15 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  (V 88) Eliminationsgrade von 53,4 % (NH<sub>4</sub>N) bzw. 36,5 % (Nges). In vergleichbarer Größenordnung lagen die Unterschiede auch bei hydraulischen Verweilzeiten von 4 Tagen. Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  ergaben bei NH<sub>4</sub>N-Konzentrationen von 4,59 bis 5,21 g/kg Eliminationsgrade von durchschnittlich 29,5 % (NH<sub>4</sub>N) bzw. 20,4 % (Nges) (V 63, 66, 69). Demgegenüber wurden bei einer Belüftungsrate von  $15 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  unter vergleichbaren Bedingungen 58,1 % des NH<sub>4</sub>N bzw. 42,2 % des Gesamtstickstoffs eliminiert.

Tab. 4.63: Kohlenstoffstoffabbau und Stickstoff-Elimination bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von fünf Tagen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $15 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , Versuch 90

Versuchs – Nr. : 90				
Versuchsbedingungen:				
Belüftungsrate (BLR)= $15 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , Mittlere hydraulische Verweilzeit (MHV): 5 Tage				
Versuchszeit: 336 h				
Parameter		Mittel	Minimum	Maximum
TR	Zutrag [g/kg]	48,9	45,7	53,9
	Austrag [g/kg]	43,2	40,0	45,4
	WG [%]	11,6	4,2	24,5
CSB	Zutrag [g/kg]	48,3	43,4	53,6
	Austrag [g/kg]	36,5	30,9	38,9
	WG [%]	24,1	10,4	42,4
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	9,6	7,7	14,5
	Austrag [g/kg]	2,6	2,0	3,0
	WG [%]	72,2	66,7	84,3
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	4,54	4,38	4,63
	Austrag [g/kg]	1,79	1,58	2,22
	WG [%]	60,5	52,1	64,2
Nges	Zutrag [g/kg]	5,73	5,48	5,87
	Austrag [g/kg]	3,22	2,92	3,66
	WG [%]	43,9	37,1	47,0

#### 4.2..4 Quasi-kontinuierliche Versuche mit einer Belüftungsrate von $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

Versuche mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  wurden bei hydraulischen Verweilzeiten von 2, 3, 4 und 5 Tagen durchgeführt. Hydraulische Verweilzeiten von 2 Tagen führten bereits zu einem weitgehenden Abbau organischer Säuren und zu einem über 70 % igen BSB<sub>5</sub>-Abbau (Tab. 4.64 und 4.65). Bedingt durch die hohen BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen wurden Maximaltemperaturen von  $58,3 - 62,6 \text{ °C}$  (V 76) bzw.  $62,2 - 63,4 \text{ °C}$  (V 86) erzielt. Die TR-Elimination fiel mit durchschnittlich 7,1 % ebenso gering aus wie die CSB-Elimination, die im Mittel bei 26,7 % lag. Vergleichsweise hoch waren die mittlere NH<sub>4</sub>N-Elimination mit 55,9 % und die Nges-Elimination mit 35,3 %. Ein Vergleich der Versuche 62 (MHV= 2 d, BLR=  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ) und 86 (MHV= 2 d, BLR=  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ) mit vergleichbaren NH<sub>4</sub>N- und Nges-Konzentrationen zeigt erneut die wesentliche Bedeutung der Belüftungsrate für die N-Elimination. Während bei Versuch 62 27 % des NH<sub>4</sub>N eliminiert wurden, waren es bei Versuch 86 56,5 %, was einer Steigerung von 109 % entspricht. Die Nges-Elimination lag bei 18,1 % (V 62) bzw. 36,8 % (V 86), was eine Steigerung um 103 % entspricht. Die Verdopplung der Belüftungsrate bei einer hydraulischen Verweilzeit von 2 Tagen führte demzufolge auch zu einer Verdopplung der N-Elimination.

Tab. 4.64: Kohlenstoffstoffabbau und Stickstoff-Elimination bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von zwei Tagen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h), Versuch 76

Versuchs – Nr. : 76				
Versuchsbedingungen:				
Belüftungsrate (BLR)= 20 m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·h), Mittlere hydraulische Verweilzeit (MHV): 2 Tage				
Versuchszeit: 192 h				
Parameter		Mittel	Minimum	Maximum
TR	Zutrag [g/kg]	57,7	56,1	60,8
	Austrag [g/kg]	54,9	50,9	57,2
	WG [%]	4,7	- 0,2	10,9
CSB	Zutrag [g/kg]	71,0	68,6	73,6
	Austrag [g/kg]	54,0	49,3	58,2
	WG [%]	23,7	19,1	33,0
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	22,1	20,0	23,5
	Austrag [g/kg]	5,5	4,9	6,1
	WG [%]	75,1	71,6	79,2
Essigsäure	Zutrag [g/kg]	3,79	3,63	3,91
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Propionsäure	Zutrag [g/kg]	1,86	1,78	1,91
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Iso-Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,29	0,28	0,29
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,24	1,78	0,25
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Iso-Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,28	0,27	0,28
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,08	0,08	0,08
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	5,51	5,47	5,54
	Austrag [g/kg]	2,46	2,43	2,55
	WG [%]	55,3	53,7	56,1
Nges	Zutrag [g/kg]	7,20	7,06	7,37
	Austrag [g/kg]	4,77	4,66	5,02
	WG [%]	33,8	31,9	35,3

Tab. 4.65: Kohlenstoffstoffabbau und Stickstoff-Elimination bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von zwei Tagen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , Versuch 86

Versuchs – Nr.: 86				
Versuchsbedingungen:				
Belüftungsrate (BLR)= $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , Mittlere hydraulische Verweilzeit (MHV): 2 Tage				
Versuchszeit: 192 h				
Parameter		Mittel	Minimum	Maximum
TR	Zutrag [g/kg]	56,2	55,5	57,3
	Austrag [g/kg]	50,9	43,4	54,7
	WG [%]	9,4	2,0	21,8
CSB	Zutrag [g/kg]	71,6	70,3	72,4
	Austrag [g/kg]	50,3	43,6	54,0
	WG [%]	29,7	25,4	38,9
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	23,2	20,8	24,4
	Austrag [g/kg]	6,7	4,5	10,0
	WG [%]	70,2	51,9	81,6
Essigsäure	Zutrag [g/kg]	4,50	4,27	4,63
	Austrag [g/kg]	0,50	0,01	1,56
	WG [%]	87,6	63,5	99,8
Propionsäure	Zutrag [g/kg]	2,20	2,12	2,27
	Austrag [g/kg]	0,14	0,00	0,52
	WG [%]	93,5	75,5	100,0
Iso-Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,34	0,33	0,35
	Austrag [g/kg]	0,02	0,00	0,07
	WG [%]	94,8	78,8	100,0
Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,31	0,29	0,33
	Austrag [g/kg]	0,02	0,00	0,08
	WG [%]	91,7	72,4	100,0
Iso-Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,54	0,52	0,56
	Austrag [g/kg]	0,04	0,00	0,15
	WG [%]	92,0	72,7	100,0
Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,08	0,07	0,08
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,01
	WG [%]	98,0	85,7	100,0
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	5,34	5,30	5,37
	Austrag [g/kg]	2,32	1,97	3,12
	WG [%]	56,5	41,1	63,0
Nges	Zutrag [g/kg]	6,89	6,78	6,96
	Austrag [g/kg]	4,36	4,00	4,67
	WG [%]	36,8	31,6	42,5



Hydraulische Verweilzeiten von 3 Tagen führten zu einer Steigerung der TR-Elimination von 7,1 % (MHV= 2 d) auf durchschnittlich 12,3 % (Tab. 4.66 – 4.68).

Die Belüftungsrate hat bei einer hydraulischen Verweilzeit von 3 Tagen keinen erheblichen Einfluss auf die TR-Elimination, wie ein Vergleich der Versuche 70, 107 (BLR= 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)), 88 (BLR= 15 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)) und 75, 85 und 111 (BLR= 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)) zeigt. In allen Fällen lag sie bei 10 bis 13,5 %.

Die CSB-Elimination betrug bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von 3 Tagen im Mittel 34,5 %. Im Vergleich zu den Versuchen mit Belüftungsraten von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) (V 70, V 107) und 15 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) (V 88) wurde nur eine geringfügige Verbesserung der CSB-Elimination erzielt.

Entsprechend den BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen im Zutrag wurden bei Versuch 75 (BSB<sub>5</sub>: 18 g/kg) , 85 (BSB<sub>5</sub>: 23,1 g/kg) und 111 (BSB<sub>5</sub>: 39,3 g/kg) Maximaltemperaturen von 39,7 – 53 °C (V 75), 43,8 – 60,3 °C (V 85) bzw. 40,1 – 64,6 °C (V 111) erreicht. Der BSB<sub>5</sub>-Abbau lag im Mittel bei 80,6 % und damit um 11 % über dem, der bei hydraulischen Verweilzeiten von 2 Tagen gemessen wurde. Bei BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen unter 20 g/kg hatte die Belüftungsrate bei hydraulischen Verweilzeiten von 3 Tagen keinen erkennbaren Einfluss auf den erzielten Abbaugrad (V 70, V 88, V 75, V 85).

Eine Sauerstofflimitierung wurde nur bei sehr hohen BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen von 38,4 g/kg und einer Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) (V 107) festgestellt. Sie führte zu deutlich erhöhten BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen im Austrag (10,2 g/kg). Unter diesen Bedingungen war auch der Abbau organischer Säuren unzureichend. Belüftungsraten von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) führten bei vergleichbaren Konzentrationen an BSB<sub>5</sub> und organischen Säuren und hydraulischen Verweilzeiten von 3 Tagen zu einem quantitativen Abbau (V 111).

Organische Säuren wurden unter diesen Bedingungen auch bei sehr hohen Essigsäure-Konzentrationen von 11,13 g/kg quantitativ oxidiert.

Die NH<sub>4</sub>N-Elimination fiel mit durchschnittlich 66,1 % vergleichsweise günstig aus. Während bei Versuch 70 (MHV= 3 d, BLR= 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)) bei vergleichbaren NH<sub>4</sub>N-Konzentrationen 33,6 % des NH<sub>4</sub>N und bei Versuch 88 (MHV= 3 d, BLR= 15 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)) 53,4 % eliminiert wurden, lag sie bei Versuch 85 (MHV= 3 d, BLR= 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)) bei 67,8 %. Die entsprechenden Ergebnisse für die Nges-Elimination lagen bei 20,2 % (V 70), 36,5 % (V 88) und 44,1 % (V 85).

Tab. 4.66: Kohlenstoffstoffabbau und Stickstoff-Elimination bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von drei Tagen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h), Versuch 75

Versuchs – Nr. : 75				
Versuchsbedingungen:				
Belüftungsrate (BLR)= 20 m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·h), Mittlere hydraulische Verweilzeit (MHV): 3 Tage				
Versuchszeit: 600 h				
Parameter		Mittel	Minimum	Maximum
TR	Zutrag [g/kg]	52,5	46,4	62,6
	Austrag [g/kg]	45,3	39,2	52,4
	WG [%]	13,2	5,6	29,3
CSB	Zutrag [g/kg]	64,6	57,9	73,5
	Austrag [g/kg]	42,9	35,4	51,0
	WG [%]	33,5	28,6	43,5
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	18,0	15,2	22,2
	Austrag [g/kg]	4,4	2,4	9,2
	WG [%]	75,5	42,5	85,6
Essigsäure	Zutrag [g/kg]	2,68	2,48	2,95
	Austrag [g/kg]	0,02	0,00	0,28
	WG [%]	99,1	88,9	100,0
Propionsäure	Zutrag [g/kg]	1,40	1,31	1,51
	Austrag [g/kg]	0,02	0,00	0,28
	WG [%]	98,6	79,4	100,0
Iso-Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,22	0,20	0,23
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,05
	WG [%]	98,4	76,2	100,0
Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,19	0,18	0,20
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,04
	WG [%]	98,5	77,8	100,0
Iso-Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,22	0,20	0,24
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,05
	WG [%]	98,4	76,2	100,0
Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,06	0,06	0,07
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,01
	WG [%]	99,1	85,7	100,0
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	4,90	4,52	5,54
	Austrag [g/kg]	1,79	1,35	2,40
	WG [%]	63,2	47,1	75,6
Nges	Zutrag [g/kg]	6,12	5,55	7,20
	Austrag [g/kg]	3,41	2,97	4,00
	WG [%]	43,8	31,5	52,9

Tab. 4.67: Kohlenstoffstoffabbau und Stickstoff-Elimination bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von drei Tagen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h), Versuch 85

Versuchs – Nr. : 85				
Versuchsbedingungen:				
Belüftungsrate (BLR)= 20 m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·h), Mittlere hydraulische Verweilzeit (MHV): 3 Tage				
Versuchszeit: 312 h				
Parameter		Mittel	Minimum	Maximum
TR	Zutrag [g/kg]	56,0	55,0	56,5
	Austrag [g/kg]	50,3	47,9	53,9
	WG [%]	10,2	2,0	14,7
CSB	Zutrag [g/kg]	71,4	69,5	72,7
	Austrag [g/kg]	51,7	45,0	59,3
	WG [%]	27,6	18,2	37,2
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	23,1	21,5	23,9
	Austrag [g/kg]	4,6	3,5	7,2
	WG [%]	80,2	69,8	85,4
Essigsäure	Zutrag [g/kg]	3,93	3,02	4,27
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,02
	WG [%]	100,0	99,5	100,0
Propionsäure	Zutrag [g/kg]	1,90	1,48	2,03
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Iso-Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,31	0,25	0,33
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,28	0,20	0,30
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Iso-Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,30	0,25	0,32
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,07	0,06	0,07
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	5,33	5,31	5,35
	Austrag [g/kg]	1,72	1,59	1,94
	WG [%]	67,8	63,5	70,3
Nges	Zutrag [g/kg]	6,95	6,85	7,09
	Austrag [g/kg]	3,86	3,59	4,11
	WG [%]	44,4	40,0	47,6

Tab. 4.68: Kohlenstoffstoffabbau und Stickstoff-Elimination bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von drei Tagen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , Versuch 111

Versuchs – Nr.: 111				
Versuchsbedingungen:				
Belüftungsrate (BLR)= $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , Mittlere hydraulische Verweilzeit (MHV): 3 Tage				
Versuchszeit: 336 h				
Parameter		Mittel	Minimum	Maximum
TR	Zutrag [g/kg]	74,0	68,2	84,6
	Austrag [g/kg]	63,8	54,0	71,8
	WG [%]	13,5	3,62	26,7
CSB	Zutrag [g/kg]	112,7	104,8	124,7
	Austrag [g/kg]	65,0	54,6	73,0
	WG [%]	42,3	37,3	52,8
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	39,3	35,9	44,1
	Austrag [g/kg]	5,5	4,4	6,4
	WG [%]	86,1	83,6	88,2
Essigsäure	Zutrag [g/kg]	11,13	10,20	12,11
	Austrag [g/kg]	0,20	0,13	0,29
	WG [%]	98,2	97,3	98,8
Propionsäure	Zutrag [g/kg]	3,30	2,23	3,72
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Iso-Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,93	0,60	1,04
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Buttersäure	Zutrag [g/kg]	2,09	1,40	2,26
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Iso-Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	1,17	0,78	1,43
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	n. n.	n. n.	n. n.
	Austrag [g/kg]	n. n.	n. n.	n. n.
	WG [%]	n. n.	n. n.	n. n.
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	7,65	7,54	7,83
	Austrag [g/kg]	2,50	2,10	2,84
	WG [%]	67,3	63,7	72,2
Nges	Zutrag [g/kg]	9,76	9,47	10,48
	Austrag [g/kg]	5,39	4,86	5,91
	WG [%]	44,8	41,6	49,4

n. n.= nicht nachweisbar

Hydraulische Verweilzeiten von vier Tagen führten – abgesehen von einer Verbesserung der TR-Elimination - weder zu einer deutlichen Steigerung des Kohlenstoffabbaus noch zu einer signifikanten Verbesserung der N-Elimination (Tab. 4.69 – 4.72). Dies lag im wesentlichen an den geringen Konzentrationen der untersuchten Parameter im Zutrag. Eine Verbesserung der Abbau- und Eliminationsgrade wäre nur bei hoch konzentrierten Gällen zu erwarten gewesen. Lediglich bei Versuch 112 (Tab. 4.72) haben diese Bedingungen vorgelegen, so dass bei der weiteren Ergebnisdarstellung nur dieser Versuch eingehender besprochen wird.

Die gemittelte TR-Elimination von lediglich 5,4 % ist aus mehreren Gründen zweifelhaft. Bei den anderen Versuchen mit einer hydraulischen Verweilzeit von 4 Tagen und einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  wurden Eliminationsgrade von 17 bis 27 % gemessen. Hydraulische Verweilzeiten von 3 Tagen mit dieser Belüftungsrate erbrachten TR-Eliminationen von 10 bis 13,5 %. Die CSB-Elimination bei Versuch 112 lag mit 35,6 % im erwarteten Bereich. Da mit der CSB-Analyse auch ein wesentlicher Teil des TR erfasst wird, hätte die CSB-Elimination ebenfalls deutlich geringer ausfallen müssen. Dies war jedoch nicht der Fall. Insofern ist die gemessene TR-Elimination von nur 5,4 % offensichtlich falsch.

Die CSB-Elimination von 35,6 % bei Versuch 112 zeigt, dass eine Erhöhung der mittleren hydraulischen Verweilzeit von drei auf vier Tage (auch bei hohen Konzentrationen in der Galle) keine Verbesserung der CSB-Elimination mehr bringt. Dies gilt gleichermaßen auch für den BSB<sub>5</sub>-Abbau, was ein Vergleich der Ergebnisse von Versuch 111 und 112 (Tab. 4.68 und 4.72) bestätigt. Auch der Abbau organischer Säuren war bei beiden Versuchen nahezu identisch.

Ein Vergleich der Versuche 111 und 112 zeigt ferner, dass auch die N-Elimination durch die Erhöhung der hydraulischen Verweilzeit von drei auf vier Tage bei ansonsten vergleichbaren Bedingungen keine weitere Steigerung der N-Elimination erbrachte. Die NH<sub>4</sub>N-Elimination lag bei 67,3 % (V 111, MHV= 3 d) bzw. 66,8 % (V 112, MHV= 4 d). Auch die Nges-Elimination lag mit 44,7 % bzw. 44,5 % auf fast identischem Niveau.

Aus den Ergebnissen geht somit hervor, dass die Erhöhung der hydraulischen Verweilzeit von drei auf vier Tage bei Belüftungsraten von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  weder den Kohlenstoffabbau noch die N-Elimination verbessert. Dies gilt selbst bei sehr hoch konzentrierten Gällen, wie der Vergleich von Versuch 111 und 112 bestätigt.

Unter mesophilen Bedingungen (V 61, V65), bei denen Maximaltemperaturen von weniger als 45 °C erzielt wurden, lag die NH<sub>4</sub>N- und die Gesamtstickstoffelimination mit 44,7 – 48,4 % (NH<sub>4</sub>N) bzw. 33,1 – 34 % (Nges) deutlich unter der, die bei thermophilen Bedingungen erzielt wurde (V 74: NH<sub>4</sub>N: 66,5 %, Nges: 50,0 % bei Maximaltemperaturen von 40,7 – 50,5 °C).

Tab. 4.69: Kohlenstoffstoffabbau und Stickstoff-Elimination bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von vier Tagen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h), Versuch 65

Versuchs – Nr. : 65				
Versuchsbedingungen:				
Belüftungsrate (BLR)= 20 m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·h), Mittlere hydraulische Verweilzeit (MHV): 4 Tage				
Versuchszeit: 168 h				
Parameter		Mittel	Minimum	Maximum
TR	Zutrag [g/kg]	46,5	44,2	51,3
	Austrag [g/kg]	37,7	34,0	40,6
	WG [%]	18,8	10,4	26,7
CSB	Zutrag [g/kg]	48,6	46,1	51,0
	Austrag [g/kg]	34,8	29,1	37,8
	WG [%]	28,4	20,0	40,3
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	9,0	8,5	9,3
	Austrag [g/kg]	1,9	1,7	2,0
	WG [%]	79,3	78,5	80,0
Essigsäure	Zutrag [g/kg]	1,74	0,53	2,72
	Austrag [g/kg]	0,15	0,09	0,26
	WG [%]	93,9	89,0	96,4
Propionsäure	Zutrag [g/kg]	2,65	2,51	2,76
	Austrag [g/kg]	0,05	0,00	0,20
	WG [%]	98,0	92,0	100,0
Iso-Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,16	0,04	0,25
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Buttersäure	Zutrag [g/kg]	n. n.	n. n.	n. n.
	Austrag [g/kg]	n. n.	n. n.	n. n.
	WG [%]	n. n.	n. n.	n. n.
Iso-Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,35	0,30	0,35
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	n. n.	n. n.	n. n.
	Austrag [g/kg]	n. n.	n. n.	n. n.
	WG [%]	n. n.	n. n.	n. n.
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	4,45	4,06	4,62
	Austrag [g/kg]	2,37	2,23	2,49
	WG [%]	48,4	45,9	51,4
Nges	Zutrag [g/kg]	5,60	5,11	5,91
	Austrag [g/kg]	3,82	3,46	4,14
	WG [%]	34,0	29,9	40,7

n. n. : nicht nachweisbar

Tab. 4.70: Kohlenstoffstoffabbau und Stickstoff-Elimination bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von vier Tagen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h), Versuch 74

Versuchs – Nr. : 74				
Versuchsbedingungen:				
Belüftungsrate (BLR)= 20 m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·h), Mittlere hydraulische Verweilzeit (MHV): 4 Tage				
Versuchszeit: 216 h				
Parameter		Mittel	Minimum	Maximum
TR	Zutrag [g/kg]	39,1	33,9	48,8
	Austrag [g/kg]	29,7	28,2	34,6
	WG [%]	26,9	18,2	42,0
CSB	Zutrag [g/kg]	47,4	41,4	63,9
	Austrag [g/kg]	26,9	24,4	32,6
	WG [%]	45,6	38,9	56,4
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	16,2	12,8	18,0
	Austrag [g/kg]	2,3	1,4	2,8
	WG [%]	86,6	84,0	92,1
Essigsäure	Zutrag [g/kg]	4,52	4,06	4,77
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Propionsäure	Zutrag [g/kg]	2,39	2,08	2,52
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Iso-Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,39	0,30	0,48
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,30	0,27	0,36
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Iso-Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,38	0,31	0,40
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	n. n.	n. n.	n. n.
	Austrag [g/kg]	n. n.	n. n.	n. n.
	WG [%]	n. n.	n. n.	n. n.
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	4,44	4,33	4,70
	Austrag [g/kg]	1,50	1,36	1,64
	WG [%]	66,5	62,2	70,4
Nges	Zutrag [g/kg]	5,31	4,97	5,72
	Austrag [g/kg]	2,70	2,61	2,84
	WG [%]	50,3	47,5	53,1

n. n. : nicht nachweisbar

Tab. 4.71: Kohlenstoffstoffabbau und Stickstoff-Elimination bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von vier Tagen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h), Versuch 61

Versuchs – Nr. : 61				
Versuchsbedingungen:				
Belüftungsrate (BLR)= 20 m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·h), Mittlere hydraulische Verweilzeit (MHV): 4 Tage				
Versuchszeit: 264 h				
Parameter		Mittel	Minimum	Maximum
TR	Zutrag [g/kg]	52,6	40,9	58,3
	Austrag [g/kg]	45,9	42,5	49,1
	WG [%]	17,5	12,1	24,2
CSB	Zutrag [g/kg]	53,2	41,2	58,9
	Austrag [g/kg]	38,1	36,8	39,4
	WG [%]	33,0	26,2	36,3
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	10,3	8,6	11,9
	Austrag [g/kg]	2,0	1,0	4,3
	WG [%]	81,1	59,1	89,3
Essigsäure	Zutrag [g/kg]	1,98	1,71	2,27
	Austrag [g/kg]	0,42	0,37	0,49
	WG [%]	78,3	77,1	80,1
Propionsäure	Zutrag [g/kg]	1,97	1,7	2,23
	Austrag [g/kg]	0,31	0,26	0,35
	WG [%]	84,2	82,8	85,7
Iso-Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,16	0,12	0,22
	Austrag [g/kg]	0,02	0,00	0,03
	WG [%]	86,7	78,6	100,0
Buttersäure	Zutrag [g/kg]	n. n.	n. n.	n. n.
	Austrag [g/kg]	n. n.	n. n.	n. n.
	WG [%]	n. n.	n. n.	n. n.
Iso-Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,31	0,26	0,35
	Austrag [g/kg]	0,00	0,04	0,06
	WG [%]	83,7	81,5	84,9
Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	n. n.	n. n.	n. n.
	Austrag [g/kg]	n. n.	n. n.	n. n.
	WG [%]	n. n.	n. n.	n. n.
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	5,02	4,97	5,06
	Austrag [g/kg]	2,78	2,66	3,10
	WG [%]	44,7	38,5	47,1
Nges	Zutrag [g/kg]	6,22	5,99	6,36
	Austrag [g/kg]	4,19	4,03	4,53
	WG [%]	33,1	26,2	36,1

n. n. : nicht nachweisbar



Tab. 4.72: Kohlenstoffabbau und Stickstoff-Elimination bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von vier Tagen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h), Versuch 112

Versuchs – Nr. : 112				
Versuchsbedingungen:				
Belüftungsrate (BLR)= 20 m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·h), Mittlere hydraulische Verweilzeit (MHV): 4 Tage				
Versuchszeit: 264 h				
Parameter		Mittel	Minimum	Maximum
TR	Zutrag [g/kg]	72,2	67,9	82,8
	Austrag [g/kg]	68,3	57,6	82,4
	WG [%]	5,4	- 7,4	16,9
CSB	Zutrag [g/kg]	106,8	103,4	117,9
	Austrag [g/kg]	68,6	64,4	74,1
	WG [%]	35,6	31,0	43,7
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	41,0	38,9	42,4
	Austrag [g/kg]	6,9	5,6	8,1
	WG [%]	83,2	79,2	86,6
Essigsäure	Zutrag [g/kg]	11,60	10,94	12,04
	Austrag [g/kg]	0,30	0,18	0,49
	WG [%]	97,7	95,9	98,4
Propionsäure	Zutrag [g/kg]	3,40	3,30	3,62
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Iso-Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,98	0,94	1,01
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Buttersäure	Zutrag [g/kg]	2,21	2,10	2,33
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Iso-Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	1,21	1,13	1,42
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	n. n.	n. n.	n. n.
	Austrag [g/kg]	n. n.	n. n.	n. n.
	WG [%]	n. n.	n. n.	n. n.
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	7,70	7,61	7,95
	Austrag [g/kg]	2,56	1,99	3,30
	WG [%]	66,8	57,1	73,9
Nges	Zutrag [g/kg]	9,65	9,44	9,92
	Austrag [g/kg]	5,36	4,71	6,07
	WG [%]	44,5	38,2	52,2

n. n. : nicht nachweisbar

Bei hydraulischen Verweilzeiten von fünf Tagen wurde nur ein Versuch durchgeführt (Tab. 4.73). Auch bei diesem Versuch konnte weder eine weitere Steigerung des Kohlenstoffabbaus noch eine zusätzliche Verbesserung der N-Elimination erzielt werden. Die bei diesem Versuch erzielten Maximaltemperaturen lagen bei 42,5 – 49,5 °C.

Tab. 4.73: Kohlenstoffstoffabbau und Stickstoff-Elimination bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von fünf Tagen bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h), Versuch 87

Versuchs – Nr. : 87				
Versuchsbedingungen:				
Belüftungsrate (BLR)= 20 m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·h), Mittlere hydraulische Verweilzeit (MHV): 5 Tage				
Versuchszeit: 336 h				
Parameter		Mittel	Minimum	Maximum
TR	Zutrag [g/kg]	54,7	53,5	57,3
	Austrag [g/kg]	52,0	49,5	56,5
	WG [%]	4,9	- 3,9	11,0
CSB	Zutrag [g/kg]	57,1	52,3	59,3
	Austrag [g/kg]	44,9	39,0	50,1
	WG [%]	21,4	4,2	30,2
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	15,7	13,4	19,8
	Austrag [g/kg]	2,9	2,2	3,8
	WG [%]	81,3	75,0	85,4
Essigsäure	Zutrag [g/kg]	2,10	1,69	2,38
	Austrag [g/kg]	0,03	0,02	0,08
	WG [%]	98,6	96,4	99,2
Propionsäure	Zutrag [g/kg]	1,20	0,93	1,26
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,03
	WG [%]	99,7	97,6	100,0
Iso-Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,18	0,14	0,19
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Buttersäure	Zutrag [g/kg]	0,08	0,06	0,12
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Iso-Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,28	0,23	0,30
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
Valeriansäure	Zutrag [g/kg]	0,05	0,04	0,06
	Austrag [g/kg]	0,00	0,00	0,00
	WG [%]	100,0	100,0	100,0
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	5,33	5,29	5,47
	Austrag [g/kg]	1,94	1,81	2,17
	WG [%]	63,6	60,3	66,0
Nges	Zutrag [g/kg]	6,84	6,77	6,92
	Austrag [g/kg]	3,86	3,65	4,07
	WG [%]	43,5	40,3	46,4

### 4.3 Massenstrom-Bilanzen

Weitere Ergebnisse zum Umfang des Stoffumsatzes und maßgeblicher Einflussgrößen bei den quasi-kontinuierlichen Versuchen liefern die Massenstrom-Bilanzen. Die Massenströme wurden aus dem Produkt der täglichen Austauschmasse und der Konzentration des betrachteten Parameters sowohl für den Zutrag als auch für den Austrag errechnet. Die Differenz dieser Größen ergibt den täglichen Stoffumsatz.

#### 4.3.1 CSB-Massenströme

Die CSB-Massenströme wurden bei Versuchen mit Belüftungsraten von 10 und 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) für alle untersuchten hydraulischen Verweilzeiten berechnet (Tab. 4.74 und 4.75).

Tab. 4.74: CSB-Massenströme und CSB-Abbau bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) und unterschiedlichen hydraulischen Verweilzeiten und CSB-Belastungen

V-Nr.	MHV [d]	Masse [kg/d]	CSB <sub>Zutrag</sub> [kg/kg]	CSB <sub>Zutrag</sub> [kg/d]	CSB <sub>Austrag</sub> [kg/kg]	CSB <sub>Austrag</sub> [kg/d]	CSB-Abbau [kg/d]	CSB-Abbau [%]	BSB <sub>5</sub> /CSB [ - ]
64	1	400,0	0,0545	21,80	0,0433	17,32	4,48	20,6	0,17
71	2	200,0	0,0662	13,24	0,0475	9,50	3,74	28,2	0,27
62	2	200,0	0,0492	9,84	0,0421	8,42	1,42	14,4	0,19
70	3	133,3	0,0674	8,98	0,0496	6,61	2,37	26,4	0,26
107	3	133,3	0,1126	15,01	0,0746	9,94	5,07	33,8	0,34
69	4	100,0	0,0727	7,27	0,0503	5,03	2,24	30,8	0,28
66	4	100,0	0,0450	4,50	0,0348	3,48	1,02	22,7	0,21
63	4	100,0	0,0523	5,23	0,0405	4,05	1,18	22,6	0,24

Tab. 4.75: CSB-Massenströme und CSB-Abbau bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) und unterschiedlichen hydraulischen Verweilzeiten und CSB-Belastungen

V-Nr.	MHV [d]	Masse [kg/d]	CSB <sub>Zutrag</sub> [kg/kg]	CSB <sub>Zutrag</sub> [kg/d]	CSB <sub>Austrag</sub> [kg/kg]	CSB <sub>Austrag</sub> [kg/d]	CSB-Abbau [kg/d]	CSB-Abbau [%]	BSB <sub>5</sub> /CSB [ - ]
76	2	200,0	0,0710	14,20	0,0540	10,80	3,40	23,9	0,31
86	2	200,0	0,0716	14,32	0,0503	10,06	4,26	29,7	0,32
75	3	133,3	0,0646	8,61	0,0429	5,72	2,89	33,6	0,28
85	3	133,3	0,0714	9,52	0,0517	6,89	2,63	27,6	0,32
111	3	133,3	0,1127	15,02	0,0650	8,66	6,36	42,3	0,35
65	4	100,0	0,0486	4,86	0,0348	3,48	1,38	28,4	0,19
74	4	100,0	0,0474	4,74	0,0269	2,69	2,05	43,2	0,34
61	4	100,0	0,0532	5,32	0,0381	3,81	1,51	28,4	0,19
112	4	100,0	0,1068	10,68	0,0686	6,86	3,82	35,8	0,38

Unter Vernachlässigung der Versuche 62 und 64 zeigen die Ergebnisse im Trend, dass der CSB-Abbau sich als lineare Funktion der zugeführten CSB-Fracht beschreiben lässt (Abb. 4.78). Bei kurzen hydraulischen Verweilzeiten spiegelt der erzielte CSB-Abbau das  $BSB_5$ :CSB-Verhältnis in der Zutragsgülle wider, da nur leicht abbaubare C-Quellen (=  $BSB_5$ ) oxidiert werden. Die Versuche 62 und 64 weisen ein vergleichsweise geringes  $BSB_5$ :CSB-Verhältnis auf (Tab. 4.74). Durch den Mangel an leicht abbaubaren C-Quellen fiel daher auch der CSB-Abbau dieser beiden Versuche vergleichsweise gering aus. Beide Versuche wurden daher für die Funktionsanpassung nicht berücksichtigt. Ausgehend von den Funktionsanpassungen ist bei täglichen CSB-Frachten bis 15 kg/d von einem CSB-Abbau von 30 % ( $BLR = 10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ) bzw. 32,5 % ( $BLR = 20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ) auszugehen. Lediglich bei sehr kurzen hydraulischen Verweilzeiten wurden diese Abbaugrade nicht erzielt. Ein signifikanter Einfluss der Belüftungsrate auf den CSB-Abbau war bei den getesteten Belüftungsraten nicht feststellbar. Etwa 70 % des CSB in separierter Schweinegülle müssen demnach als schwer abbaubar eingestuft werden.

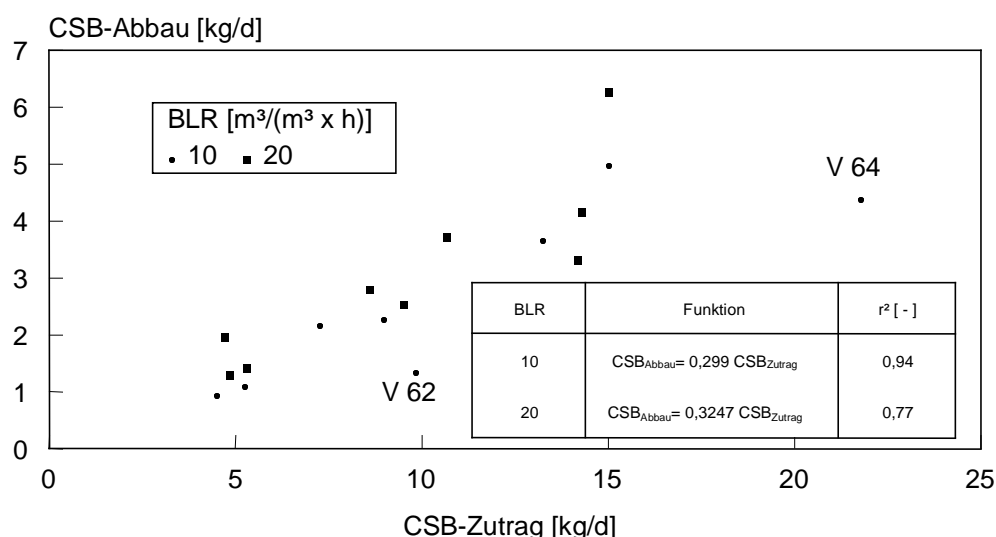


Abb. 4.78: CSB-Abbau in Abhängigkeit von dem zugeführten CSB-Massenstrom und der Belüftungsrate (BLR) bei der Belüftung separierter Schweinegülle

#### 4.3.2 $BSB_5$ -Massenströme

Auch beim  $BSB_5$  (Tab. 4.76 und 4.77) zeigen die Ergebnisse im Trend, dass sich der  $BSB_5$ -Abbau als lineare Funktion des zugeführten  $BSB_5$ -Massenstroms beschreiben lässt (Abb. 4.79). Bei Belüftungsraten von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  wurden bei  $BSB_5$ -Einträgen von bis zu 5,1 kg/d Abbaugrade von durchschnittlich 73 % nachgewiesen. Die Verdopplung der Belüftungsrate auf  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  wirkte sich kaum auf den erzielten Abbaugrad aus; er betrug durchschnittlich 79 %. Der Rest- $BSB_5$  von 15 bis 27 %, der auch bei hydraulischen Verweilzeiten von 5 Tagen (Tab. 4.73) nicht wesentlich unterschritten werden konnte, dürfte im wesentlichen auf die Grundatmung und auf die sehr langsame Oxidation schwerer abbaubarer Komponenten zurückzuführen sein.

Tab. 4.76: BSB<sub>5</sub>-Massenströme und BSB<sub>5</sub>-Abbau bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) und unterschiedlichen hydraulischen Verweilzeiten und BSB<sub>5</sub>-Belastungen

V-Nr.	MHV [d]	Masse [kg/d]	BSB <sub>5</sub> , Zutrag [kg/kg]	BSB <sub>5</sub> , Zutrag [kg/d]	BSB <sub>5</sub> , Austrag [kg/kg]	BSB <sub>5</sub> , Austrag [kg/d]	BSB <sub>5</sub> -Abbau [kg/d]	BSB <sub>5</sub> -Abbau [%]
64	1	400,0	0,0091	3,64	0,0025	1,00	2,64	72,5
71	2	200,0	0,0180	3,60	0,0057	1,14	2,46	68,3
62	2	200,0	0,0093	1,86	0,0040	0,80	1,06	57,0
70	3	133,3	0,0178	2,37	0,0034	0,45	1,92	81,0
107	3	133,3	0,0384	5,12	0,0102	1,36	3,76	73,4
69	4	100,0	0,0204	2,04	0,0033	0,33	1,71	83,8
66	4	100,0	0,0095	0,95	0,0013	0,13	0,82	89,1
63	4	100,0	0,0124	1,24	0,0020	0,20	1,04	83,9

Tab. 4.77: BSB<sub>5</sub>-Massenströme und BSB<sub>5</sub>-Abbau bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) und unterschiedlichen hydraulischen Verweilzeiten und BSB<sub>5</sub>-Belastungen

V-Nr.	MHV [d]	Masse [kg/d]	BSB <sub>5</sub> , Zutrag [kg/kg]	BSB <sub>5</sub> , Zutrag [kg/d]	BSB <sub>5</sub> , Austrag [kg/kg]	BSB <sub>5</sub> , Austrag [kg/d]	BSB <sub>5</sub> -Abbau [kg/d]	BSB <sub>5</sub> -Abbau [%]
76	2	200,0	0,0221	4,42	0,0055	1,10	3,32	75,1
86	2	200,0	0,0232	4,64	0,0067	1,34	3,30	71,1
75	3	133,3	0,0180	2,40	0,0044	0,59	1,81	75,4
85	3	133,3	0,0231	3,08	0,0046	0,61	2,47	80,2
111	3	133,3	0,0393	5,24	0,0055	0,73	4,51	86,1
65	4	100,0	0,0090	0,90	0,0019	0,19	0,71	78,9
74	4	100,0	0,0162	1,62	0,0023	0,23	1,39	85,8
61	4	100,0	0,0103	1,03	0,0020	0,20	0,83	80,6
112	4	100,0	0,0410	4,10	0,0069	0,69	3,41	83,2

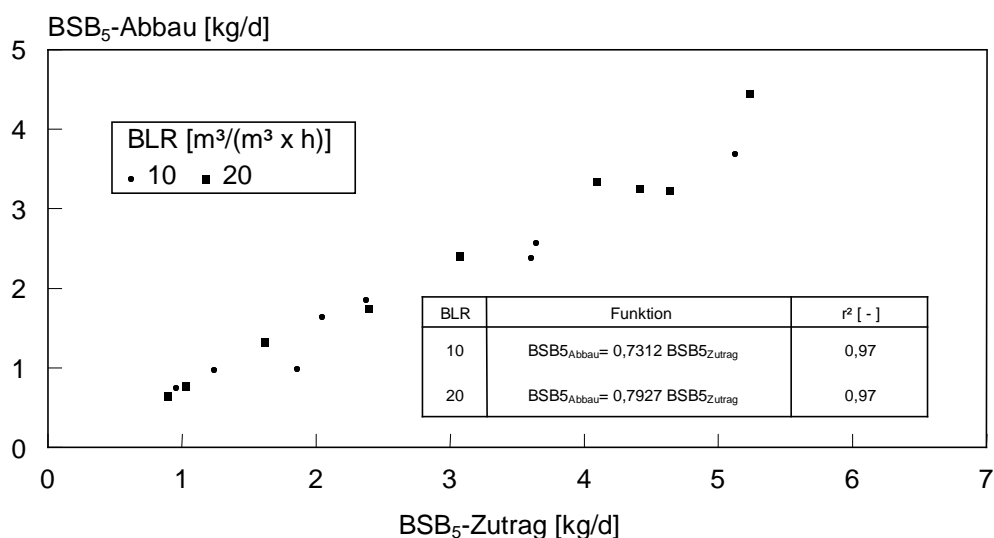


Abb. 4.79: BSB<sub>5</sub>-Abbau in Abhängigkeit von dem zugeführten BSB<sub>5</sub>-Massenstrom und der Belüftungsrate (BLR) bei der Belüftung separierter Schweinegülle

### 4.3.3 Essigsäure-Massenströme

Essigsäure gehört zu den sehr leicht abbaubaren Substraten. Dementsprechend wurde bei Massenströmen von bis zu 1 kg/d und Belüftungsraten von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) bei allen hydraulischen Verweilzeiten praktisch ein (fast) quantitativer Abbau von durchschnittlich 93 % erzielt (Tab. 4.78). Der Abbau war in linearer Weise abhängig von dem zugeführten Massenstrom (Abb. 4.80). Nicht berücksichtigt wurde der Versuch 107, bei dem der Essigsäure-Abbau deutlich geringer ausfiel. Die Ursache hierfür dürfte in einer weitgehenden thermischen Inaktivierung der Mikroorganismen zu sehen sein, da bei diesem Versuch regelmäßig Temperaturen von mehr als 60 °C erzielt wurden. Lineare Zusammenhänge zwischen zugeführtem Massenstrom und erreichtem Abbau wurden auch bei Belüftungsraten von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) erzielt (Abb. 4.80). Der durchschnittliche Abbaugrad lag unter diesen Bedingungen bei 97 %. Der Einfluss der Belüftungsrate auf den erzielten Abbaugrad war somit vernachlässigbar klein.

Tab. 4.78: Essigsäure-Massenströme und Essigsäure-Abbau bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) und unterschiedlichen hydraulischen Verweilzeiten und Essigsäure-Belastungen

V-Nr.	MHV [d]	Masse [kg/d]	C2 <sub>Zutrag</sub> [kg/kg]	C2 <sub>Zutrag</sub> [kg/d]	C2 <sub>Austrag</sub> [kg/kg]	C2 <sub>Austrag</sub> [kg/d]	C2-Abbau	
							[kg/d]	[%]
64	1	400,0	0,00253	1,01	0,00022	0,09	0,92	91,1
71	2	200,0	0,00471	0,94	0,00040	0,08	0,86	91,5
62	2	200,0	0,00130	0,26	0,00022	0,04	0,22	84,6
70	3	133,3	0,00457	0,61	0	0	0,61	100,0
107	3	133,3	0,00970	1,29	0,00360	0,48	0,81	62,8
69	4	100,0	0,00476	0,48	0,00020	0,02	0,46	95,8
66	4	100,0	0,00107	0,11	0,00013	0,01	0,10	90,9
63	4	100,0	0,00290	0,29	0,00023	0,02	0,27	93,1

C2= Essigsäure

Tab. 4.79: Essigsäure-Massenströme und Essigsäure-Abbau bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) und unterschiedlichen hydraulischen Verweilzeiten und Essigsäure-Belastungen

V-Nr.	MHV [d]	Masse [kg/d]	C2 <sub>Zutrag</sub> [kg/kg]	C2 <sub>Zutrag</sub> [kg/d]	C2 <sub>Austrag</sub> [kg/kg]	C2 <sub>Austrag</sub> [kg/d]	C2-Abbau	
							[kg/d]	[%]
76	2	200,0	0,00379	0,76	0	0	0,76	100,0
86	2	200,0	0,00450	0,90	0,00050	0,100	0,80	88,9
75	3	133,3	0,00268	0,36	0,00002	0,003	0,36	100,0
85	3	133,3	0,00393	0,52	0	0	0,52	100,0
111	3	133,3	0,01113	1,48	0,00020	0,027	1,45	98,0
65	4	100,0	0,00174	0,17	0,00015	0,015	0,16	94,1
74	4	100,0	0,00452	0,45	0	0	0,45	100,0
61	4	100,0	0,00198	0,20	0,00042	0,042	0,16	80,0
112	4	100,0	0,01160	1,16	0,00030	0,030	1,13	97,4

C2= Essigsäure

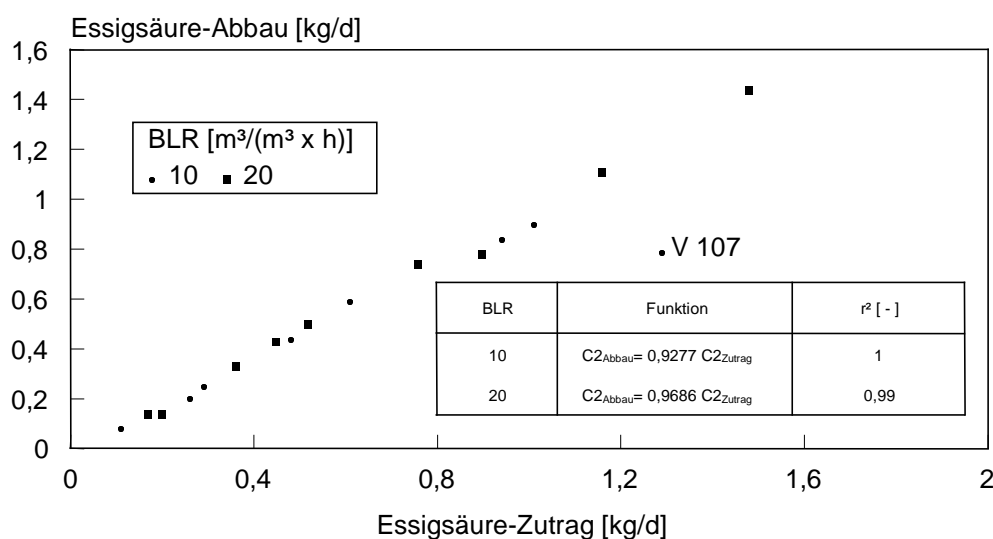


Abb. 4.80: Essigsäure-Abbau in Abhängigkeit von dem zugeführten Essigsäure-Massenstrom und der Belüftungsrate (BLR) bei der Belüftung separierter Schweinegülle

#### 4.3.4 Propionsäure-Massenströme

Der Propionsäure-Abbau (Tab. 4.80 und 4.81) war in linearer Weise vom zugeführten Massenstrom abhängig (Abb. 4.81). Selbst bei sehr kurzen hydraulischen Verweilzeiten wurde ein fast quantitativer Abbau erzielt. Die Belüftungsrate hatte bei den getesteten Bedingungen praktisch keinen Einfluss auf den erzielten Abbaugrad, der bei Belüftungsraten von 10 m³/(m³·h) bei 95 % und bei 20 m³/(m³·h) bei 98 % lag.

Tab. 4.80: Propionsäure-Massenströme und Propionsäure-Abbau bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 10 m³/(m³·h) und unterschiedlichen hydraulischen Verweilzeiten und Propionsäure-Belastungen

V-Nr.	MHV [d]	Masse [kg/d]	C3 <sub>Zutrag</sub> [kg/kg]	C3 <sub>Zutrag</sub> [kg/d]	C3 <sub>Austrag</sub> [kg/kg]	C3 <sub>Austrag</sub> [kg/d]	C3-Abbau [kg/d]	C3-Abbau [%]
64	1	400,0	0,00163	0,65	0,00010	0,04	0,61	93,8
71	2	200,0	0,00239	0,48	0	0	0,48	100,0
62	2	200,0	0,00154	0,31	0,00022	0,04	0,26	83,9
70	3	133,3	0,00239	0,32	0	0	0,32	100,0
107	3	133,3	0,00280	0,37	0,00016	0,02	0,35	94,6
69	4	100,0	0,00240	0,24	0	0	0,24	100,0
66	4	100,0	0,00164	0,16	0,00006	0	0,16	100,0
63	4	100,0	0,00169	0,17	0,00008	0,01	0,16	94,1

C3= Propionsäure

Tab. 4.81: Propionsäure-Massenströme und Propionsäure-Abbau bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  und unterschiedlichen hydraulischen Verweilzeiten und Propionsäure-Belastungen

V-Nr.	MHV [d]	Masse [kg/d]	C3 <sub>Zutrag</sub> [kg/kg]	C3 <sub>Zutrag</sub> [kg/d]	C3 <sub>Austrag</sub> [kg/kg]	C3 <sub>Austrag</sub> [kg/d]	C3-Abbau [kg/d]	C3-Abbau [%]
76	2	200,0	0,00186	0,372	0	0	0,372	100,0
86	2	200,0	0,00220	0,440	0,00014	0,0280	0,412	93,6
75	3	133,3	0,00140	0,187	0,00002	0,0027	0,184	98,4
85	3	133,3	0,00190	0,253	0	0	0,253	100,0
111	3	133,3	0,00330	0,440	0	0	0,440	100,0
65	4	100,0	0,00265	0,265	0,00005	0,0050	0,260	98,1
74	4	100,0	0,00239	0,239	0	0	0,239	100,0
61	4	100,0	0,00197	0,197	0,00031	0,031	0,166	84,3
112	4	100,0	0,00340	0,340	0	0	0,340	100,0

C3= Propionsäure

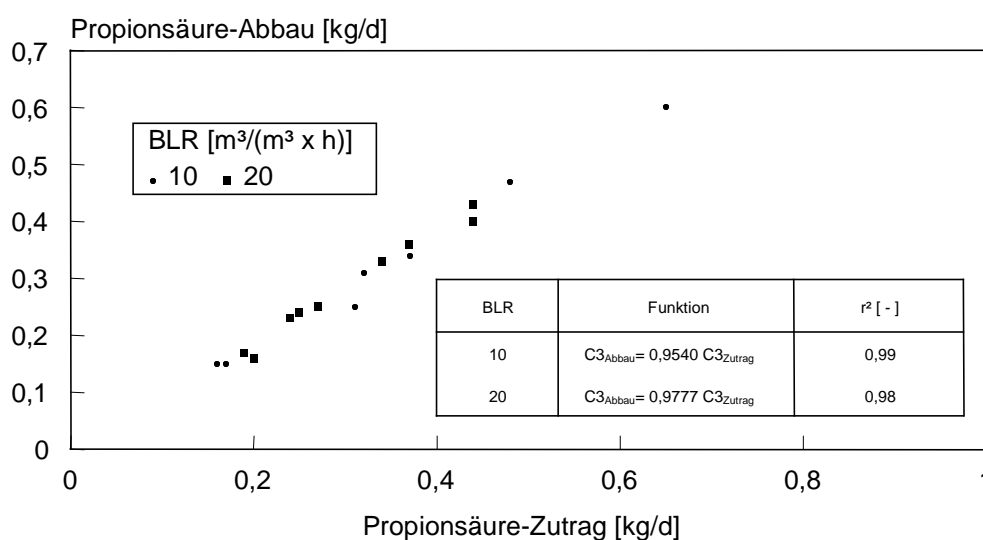


Abb. 4.81: Propionsäure-Abbau in Abhängigkeit von dem zugeführten Propionsäure-Massenstrom und der Belüftungsrate (BLR) bei der Belüftung separierter Schweinegülle

#### 4.3.5 $\text{NH}_4\text{N}$ -Massenströme

Während beim CSB-, BSB<sub>5</sub>- Essigsäure- und Propionsäureumsatz lineare Zusammenhänge des zugeführten Massenstroms und dem erzielten Abbau mit hohen Bestimmtheitsmaßen gefunden wurden, ergaben sich bei den  $\text{NH}_4\text{N}$ -Massenströmen eindeutig andere Ergebnisse (Tab. 4.82 – 4.84, Abb. 4.82).



Tab. 4.82:  $\text{NH}_4\text{N}$ -Massenströme und  $\text{NH}_4\text{N}$ -Abbau bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  und unterschiedlichen hydraulischen Verweilzeiten und  $\text{NH}_4\text{N}$ -Belastungen

V-Nr.	MHV [d]	Masse [kg/d]	$\text{NH}_4\text{N}_{\text{Zutrag}}$ [kg/kg]	$\text{NH}_4\text{N}_{\text{Zutrag}}$ [kg/d]	$\text{NH}_4\text{N}_{\text{Austrag}}$ [kg/kg]	$\text{NH}_4\text{N}_{\text{Austrag}}$ [kg/d]	$\text{NH}_4\text{N}$ -Abbau [kg/d] [%]	
64	1	400,0	0,00470	1,88	0,00383	1,53	0,35	18,6
71	2	200,0	0,00479	0,96	0,00342	0,68	0,27	28,1
62	2	200,0	0,00499	1,00	0,00364	0,73	0,27	27,0
70	3	133,3	0,00521	0,69	0,00346	0,46	0,23	33,3
107	3	133,3	0,00747	1,00	0,00432	0,58	0,42	42,0
69	4	100,0	0,00521	0,52	0,00339	0,34	0,18	34,6
66	4	100,0	0,00459	0,46	0,00317	0,32	0,14	30,4
63	4	100,0	0,00487	0,49	0,00379	0,38	0,11	22,4

Tab. 4.83:  $\text{NH}_4\text{N}$ -Massenströme und  $\text{NH}_4\text{N}$ -Abbau bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $15 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  und unterschiedlichen hydraulischen Verweilzeiten und  $\text{NH}_4\text{N}$ -Belastungen

V-Nr.	MHV [d]	Masse [kg/d]	$\text{NH}_4\text{N}_{\text{Zutrag}}$ [kg/kg]	$\text{NH}_4\text{N}_{\text{Zutrag}}$ [kg/d]	$\text{NH}_4\text{N}_{\text{Austrag}}$ [kg/kg]	$\text{NH}_4\text{N}_{\text{Austrag}}$ [kg/d]	$\text{NH}_4\text{N}$ -Abbau [kg/d] [%]	
88	3	133,3	0,00514	0,69	0,00241	0,32	0,36	52,2
91	4	100,0	0,00434	0,43	0,00182	0,18	0,25	58,1
90	5	80,0	0,00454	0,36	0,00179	0,14	0,22	61,1

Tab. 4.84:  $\text{NH}_4\text{N}$ -Massenströme und  $\text{NH}_4\text{N}$ -Abbau bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  und unterschiedlichen hydraulischen Verweilzeiten und  $\text{NH}_4\text{N}$ -Belastungen

V-Nr.	MHV [d]	Masse [kg/d]	$\text{NH}_4\text{N}_{\text{Zutrag}}$ [kg/kg]	$\text{NH}_4\text{N}_{\text{Zutrag}}$ [kg/d]	$\text{NH}_4\text{N}_{\text{Austrag}}$ [kg/kg]	$\text{NH}_4\text{N}_{\text{Austrag}}$ [kg/d]	$\text{NH}_4\text{N}$ -Abbau [kg/d] [%]	
76	2	200,0	0,00551	1,10	0,00246	0,492	0,61	55,5
86	2	200,0	0,00534	1,07	0,00232	0,464	0,60	56,1
75	3	133,3	0,00490	0,65	0,00179	0,239	0,41	63,1
85	3	133,3	0,00533	0,71	0,00172	0,229	0,48	67,6
111	3	133,3	0,00765	1,02	0,00250	0,333	0,69	67,6
65	4	100,0	0,00445	0,45	0,00237	0,237	0,21	46,7
74	4	100,0	0,00440	0,44	0,00150	0,150	0,29	65,9
61	4	100,0	0,00502	0,50	0,00278	0,278	0,22	44,0
112	4	100,0	0,00770	0,77	0,00256	0,256	0,51	66,2

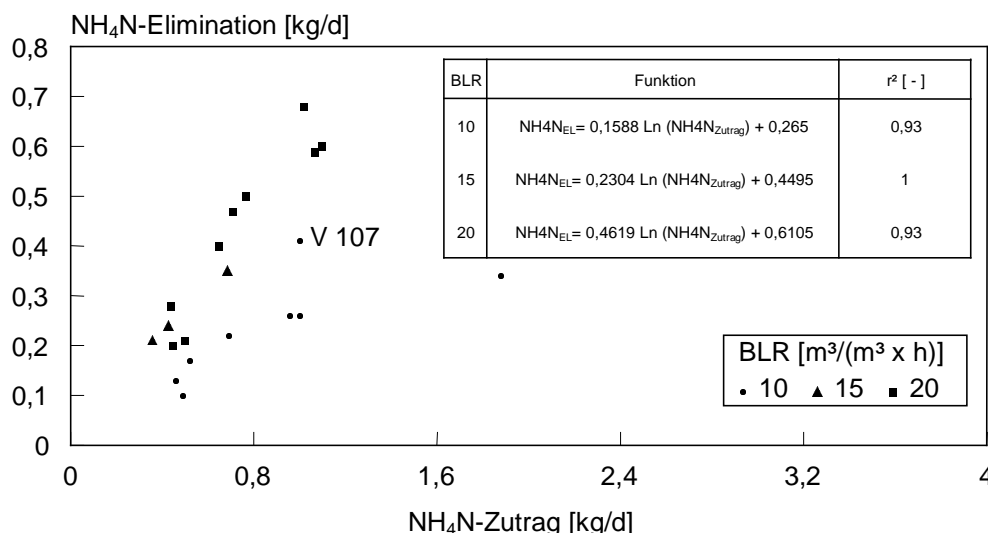


Abb. 4.82:  $\text{NH}_4\text{N}$ -Elimination in Abhängigkeit von dem zugeführten  $\text{NH}_4\text{N}$ -Massenstrom und der Belüftungsrate bei der Belüftung separierter Schweinegülle

Die  $\text{NH}_4\text{N}$ -Elimination lässt sich als logarithmische Funktion des zugeführten Massenstroms beschreiben (Abb. 4.82). Bei Belüftungsraten von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  wären demnach auf der Grundlage der Funktionsgleichung maximale Eliminationsgrade von 32 % bei einem Massenstrom von  $0,5 \text{ kg/d}$  im Zutrag zu erreichen. Geringere oder höhere Massenströme im Zutrag würden in beiden Fällen zu einer Verschlechterung des Wirkungsgrades führen. Der Versuch 107 wurde wegen der extrem hohen Temperaturen, die eine deutliche Verbesserung der  $\text{NH}_4\text{N}$ -Elimination erlaubten, bei der Funktionsanpassung nicht berücksichtigt.

Bei Belüftungsraten von  $15 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  wären auf der Grundlage der Funktionsanpassung bei einem Massenstrom von  $0,4 \text{ kg/d}$  im Zutrag maximale Eliminationsgrade von knapp 60 % möglich (Abb. 4.82). Kleinere oder größere Massenströme im Zutrag würden den Wirkungsgrad verschlechtern.

Belüftungsraten von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  würden maximale Wirkungsgrade von 64 % bei einem Massenstrom von  $0,64 \text{ kg/d}$  im Zutrag erlauben.

Die Belüftungsrate hatte somit einen entscheidenden Einfluss auf die  $\text{NH}_4\text{N}$ -Elimination. Deutliche Steigerungen der  $\text{NH}_4\text{N}$ -Elimination über die genannten Werte hinaus ließen sich nur bei extrem hohen Temperaturen ( $> 60^\circ \text{C}$ , V 107) erreichen, deren Voraussetzung sehr hohe  $\text{BSB}_5$ -Konzentrationen sind, die in der betrieblichen Praxis jedoch in der erforderlichen Höhe kaum auftreten. Diese Steigerung würde durch zwei Effekte erreicht werden: Zum einen würde das temperaturabhängige  $\text{NH}_4^-/\text{NH}_3$ -Dissoziationsgleichgewicht auf die Seite des strippbaren Ammoniaks hin verschoben werden und zum anderen würde durch thermische Inaktivierung mesophiler Mikroorganismen der Umfang der Stickstoffassimilation verringert werden.

Ferner würde die Anhebung des pH-Wertes in der Gülle zu einer signifikanten Verbesserung der Strippung beitragen, jedoch unwirtschaftlich hohe und ökologisch bedenkliche Mengen an Alkalien erfordern (Verwertung der aerob-thermophil behandelten Gülle auf landwirtschaftlich genutzten Flächen). In separierter Schweinerohgülle üblicher Zusammensetzung wären etwa 8 kg/m<sup>3</sup> Natriumhydroxid zur Einstellung eines pH-Wertes von 10 erforderlich. Diese hohe Menge beruht im wesentlichen auf der notwendigen Überwindung des Kohlensäure-Puffers. In aerob-thermophil behandelter Gülle läge der Natriumhydroxidbedarf noch bei etwa 2 kg/m<sup>3</sup>.

#### 4.3.6 Nges-Massenströme

Die Nges-Elimination (Tab. 4.85 – 4.87) ist analog zur NH<sub>4</sub>N-Elimination in logarithmischer Weise vom Massenstrom im Zutrag abhängig (Abb. 4.83).

Tab. 4.85: Nges-Massenströme und Nges-Abbau bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) und unterschiedlichen hydraulischen Verweilzeiten und Nges-Belastungen

V-Nr.	MHV [d]	Masse [kg/d]	Nges <sub>Zutrag</sub> [kg/kg]	Nges <sub>Zutrag</sub> [kg/d]	Nges <sub>Austrag</sub> [kg/kg]	Nges <sub>Austrag</sub> [kg/d]	Nges-Abbau [kg/d] [%]	
64	1	400,0	0,00590	2,36	0,00518	2,07	0,29	12,3
71	2	200,0	0,00596	1,19	0,00526	1,05	0,14	11,8
62	2	200,0	0,00620	1,24	0,00506	1,01	0,23	18,5
70	3	133,3	0,00669	0,89	0,00534	0,71	0,18	20,2
107	3	133,3	0,00970	1,29	0,00692	0,92	0,42	32,6
69	4	100,0	0,00671	0,67	0,00522	0,52	0,15	22,4
66	4	100,0	0,00566	0,57	0,00449	0,45	0,12	21,1
63	4	100,0	0,00579	0,58	0,00476	0,48	0,10	17,2

Tab. 4.86: Nges-Massenströme und Nges-Abbau bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 15 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) und unterschiedlichen hydraulischen Verweilzeiten und Nges-Belastungen

V-Nr.	MHV [d]	Masse [kg/d]	Nges <sub>Zutrag</sub> [kg/kg]	Nges <sub>Zutrag</sub> [kg/d]	Nges <sub>Austrag</sub> [kg/kg]	Nges <sub>Austrag</sub> [kg/d]	Nges-Abbau [kg/d] [%]	
88	3	133,3	0,00653	0,87	0,00418	0,56	0,31	35,6
91	4	100,0	0,00541	0,54	0,00312	0,31	0,23	42,6
90	5	80,0	0,00573	0,46	0,00322	0,26	0,20	43,5

Tab. 4.87: Nges-Massenströme und Nges-Abbau bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) und unterschiedlichen hydraulischen Verweilzeiten und Nges-Belastungen

V-Nr.	MHV [d]	Masse [kg/d]	Nges <sub>Zutrag</sub> [kg/kg]	Nges <sub>Zutrag</sub> [kg/d]	Nges <sub>Austrag</sub> [kg/kg]	Nges <sub>Austrag</sub> [kg/d]	Nges-Abbau [kg/d]	Nges-Abbau [%]
76	2	200,0	0,00720	1,44	0,00477	0,95	0,49	34,0
86	2	200,0	0,00689	1,38	0,00436	0,87	0,51	37,0
75	3	133,3	0,00612	0,82	0,00341	0,46	0,36	43,9
85	3	133,3	0,00695	0,93	0,00386	0,52	0,41	44,1
111	3	133,3	0,00976	1,30	0,00539	0,72	0,58	44,6
65	4	100,0	0,00560	0,56	0,00382	0,38	0,18	32,1
74	4	100,0	0,00531	0,53	0,00270	0,27	0,26	49,1
61	4	100,0	0,00622	0,62	0,00419	0,42	0,20	32,3
112	4	100,0	0,00965	0,97	0,00536	0,54	0,43	44,3

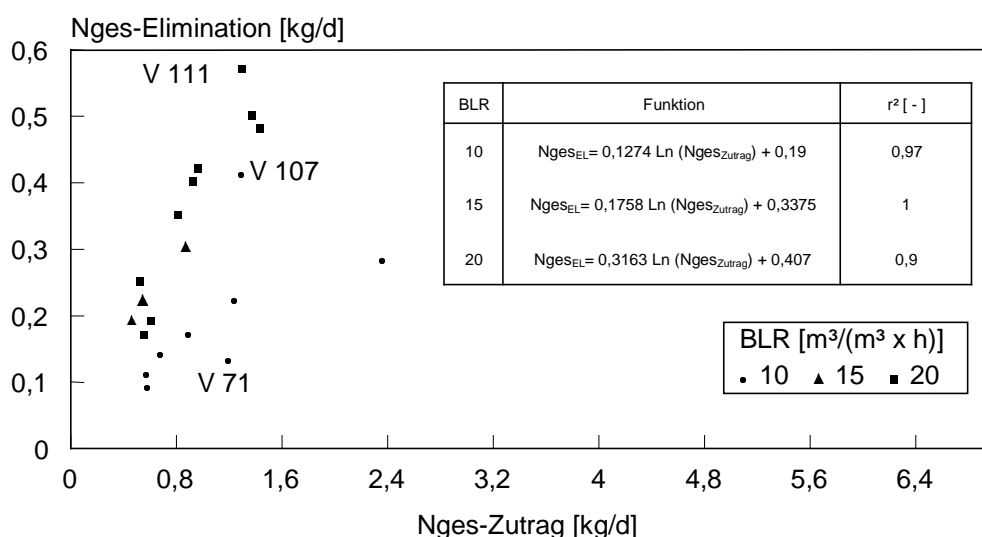


Abb. 4.83: Nges-Elimination in Abhängigkeit von dem zugeführten Nges-Massenstrom und der Belüftungsrate bei der Belüftung separierter Schweinegülle

Bei einer Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) würde auf der Grundlage der Funktionsanpassung der maximale Wirkungsgrad mit etwa 21,6 % bei einem Massenstrom von 0,6 kg/d liegen. Die Versuche 71 (Ausreißer im Vergleich zu V 62) und 107 (sehr hohe Gülletemperaturen) wurden bei der Erstellung der Funktionsanpassung nicht berücksichtigt. Geringere und höhere Zuträge würden zu einer Verschlechterung des Wirkungsgrades führen.

Belüftungsrate von 15 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) würden bei Nges-Zuträgen von 0,44 kg/d einen maximalen Wirkungsgrad von 44,1 % ermöglichen. Höhere Wirkungsgrade würden auch bei Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) nicht erreicht werden. Sie lägen bei ca. 42 % bei einem

Massenstrom von 0,8 kg/d. Bei der Erstellung der Funktionsgleichung wurde der Versuch 111 wegen sehr hoher Gülletemperaturen nicht berücksichtigt.

Der Umfang der Nges-Elimination war demnach auch in starkem Maße von der Belüftungsrate abhängig. Darüber hinaus ist die hydraulische Verweilzeit sowohl für die Ammonium- als auch für die Nges-Elimination von Bedeutung, wie nachfolgend dargelegt wird.

Werden die bei einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) erzielten Eliminationsgrade für Ammonium und Gesamtstickstoff (Kap. 4.3.5, 4.3.6) in Abhängigkeit von der hydraulischen Verweilzeit aufgetragen (Abb. 4.84), ergeben sich eindeutige Zusammenhänge.

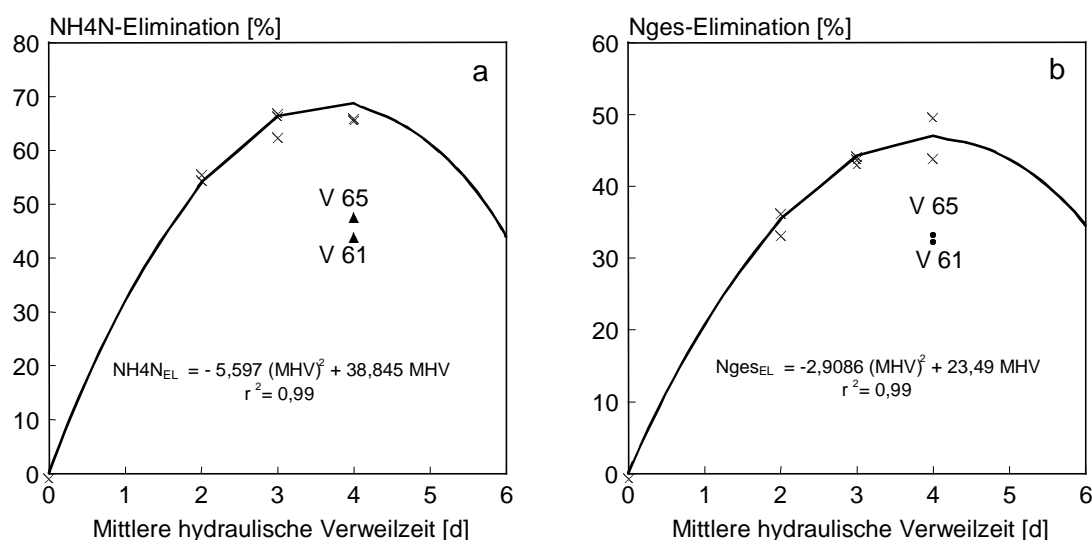


Abb. 4.84 a und b: Einfluss der hydraulischen Verweilzeit auf die NH<sub>4</sub>N- und Nges-Elimination bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)

Maximale NH<sub>4</sub>N-Eliminationen wurden mit 66 – 68 % nach hydraulischen Verweilzeiten von 3 – 4 d erzielt, sofern Maximaltemperaturen von mehr als 50 °C erreicht wurden (V 74: 66,5 % bei 50,5 °C). Höhere Maximaltemperaturen von 60,3 °C (V 85), 64,6 °C (V111), 65,2 °C (V 112) ergaben weder bei hydraulischen Verweilzeiten von 3 noch von 4 d eine weitere Verbesserung des NH<sub>4</sub>N-Eliminationsgrades (Abb. 4.84 a). Unter mesophilen Bedingungen mit Maximaltemperaturen von < 45 °C (V 65, V 61) lagen die Eliminationsgrade mit 48,4 bzw. 44,7 % jedoch deutlich unter denen, die bei vergleichbaren Verweilzeiten unter thermophilen Bedingungen erzielt wurden. Für den Nges-Eliminationsgrad wurden vergleichbare Zusammenhänge, jedoch auf niedrigerem Niveau, beobachtet. Die maximalen Eliminationsgrade lagen bei 43,5 – 50,3 % bei hydraulischen Verweilzeiten von 3 – 4 d (Abb. 4.84 b).

Die NH<sub>4</sub>N-Elimination beruht unter thermophilen Bedingungen im wesentlichen auf zwei Prozessen. Einerseits tritt ein mikrobielles Wachstum auf, das an der Selbsterhitzung abgelesen werden kann und zur Assimilation von Ammonium führt. Der Umfang dieser Assimilation ist vom Angebot leicht verfügbaren BSB<sub>5</sub> und auch von der Belüftungsrate

abhängig. Die Versuche 76 und 86 mit Belüftungsraten von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  haben gezeigt, dass bei einer hydraulischen Verweilzeit von 2 d  $\text{BSB}_5$ -Frachten von über 4,4 kg/d mit einem Wirkungsgrad von mehr als 70 % oxidiert wurden. Dementsprechend ist bei kurzen Verweilzeiten von einer großen Stickstoffassimilation auszugehen, die zur Reduzierung der  $\text{NH}_4\text{N}$ -Konzentration führt. Unter Verwendung der Funktionsanpassungen aus Abb. 4.84 a und b können die  $\text{NH}_4\text{N}$ - und die Nges-Elimination in Abhängigkeit der hydraulischen Verweilzeit und damit auch die in der Gülle verbliebenen Restkonzentrationen berechnet werden. Aus der Differenz der Nges- und der  $\text{NH}_4\text{N}$ -Konzentration ergibt sich die Konzentration des organisch gebundenen Stickstoffs, die exemplarisch für eine Gülle mit einer Nges- und  $\text{NH}_4\text{N}$ -Konzentration von 10 bzw. 8 g/kg für hydraulische Verweilzeiten von 0 bis 6 d berechnet wurde (Tab. 4.88). Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer hydraulischen Verweilzeit von 1 d bereits 67 % (0,60 g von 0,89 g in diesem Beispiel) des maximal assimilierten Stickstoffs organisch festgelegt wurden. Die Konzentration organisch gebundenen Stickstoffs steigt nach diesen Berechnungen etwa bis zu hydraulischen Verweilzeiten von 3 d an. Längere Verweilzeiten führen zur Autolyse von Organismen, die mit einer Abnahme des organisch gebundenen Stickstoffs verbunden ist. Bei hydraulischen Verweilzeiten von mehr als 5 d ist auf der Grundlage dieser Berechnungen keine Netto-Assimilation mehr vorhanden.

Tab. 4.88: Berechnete Stickstoffkonzentrationen in Abhängigkeit von der mittleren hydraulischen Verweilzeit (MHV) bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einem  $\text{NH}_4/\text{Nges}$ -Verhältnis von 0,8

MHV [d]	Nges [%]	Nges [g/kg]	$\text{NH}_4\text{N}$ [%]	$\text{NH}_4\text{N}$ [g/kg]	Norg [%]	Norg [g/kg]
0	100,0	10,0	80,0	8,0	20,0	2,0
1	79,4	7,94	53,4	5,34	26,0	2,60
2	64,7	6,47	35,8	3,58	28,9	2,89
3	55,7	5,57	27,0	2,70	28,7	2,87
4	52,6	5,26	27,4	2,74	25,2	2,52
5	55,3	5,53	36,6	3,66	18,7	1,87
6	63,8	6,38	54,7	5,47	9,1	0,91

Ferner wird aus diesen Berechnungen ersichtlich, dass unter den beschriebenen Bedingungen aus Schweinegülle maximal nur etwa 60 - 70 % des Gesamtstickstoffs eliminiert werden können, da etwa 20 % des Stickstoffs im Substrat organisch gebunden vorliegen und je nach hydraulischer Verweilzeit bis zu 17 % des bei der Belüftung eliminierten Ammoniums zusätzlich organisch gebunden werden.

#### 4.3.7 Entseuchung

Die mikrobiologischen Untersuchungen im Rahmen des quasi-kontinuierlichen Betriebes der Versuchsanlage wurden vom Institut für Umwelt- und Tierhygiene der Universität Hohenheim durchgeführt. Beprobte wurden die Versuche 75, 85, 90 und 107. Während bei Versuch 107 Keimträger (Bakterien- und Virensuspensionen) in den Bioreaktor eingebracht wurden, erfolgten die bakteriologischen Untersuchungen bei den anderen Versuchen direkt aus der Gülleprobe. Die Ergebnisse der Versuche 75 und 85 (BLR:  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , MHV= 3 d), bei

denen Maximaltemperaturen von durchschnittlich 53 °C (50,2 – 56,0 °C) (V 75) bzw. 60,3 °C (57,4 – 63,3 °C) (V 85) erreicht wurden, sind in Tab. 4.89 und 4.90 zusammengefasst.

Tab. 4.89 Inaktivierung von pathogenen Bakterien bei der Belüftung separierter Schweinegülle (BLR: 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h), MHV: 3 d) bei Maximaltemperaturen von 50,2 – 56 °C (Versuch 75)

Zeit [h]	GKZ [KBE/ml]	EBA [KBE/ml]	E. coli [KBE/ml]	FKS [KBE/ml]	Sal. [KBE/ml]	pH [ - ]	T [°C]	NH <sub>4</sub> N [g/kg]
Z <sub>0</sub>	8,8 x 10 <sup>5</sup>	9,5 x 10 <sup>2</sup>	9,5 x 10 <sup>2</sup>	4,5 x 10 <sup>4</sup>	n. n.	7,5	RT	4,53
Z <sub>360</sub>	1,7 x 10 <sup>6</sup>	2,5 x 10 <sup>3</sup>	1,5 x 10 <sup>3</sup>	0,7 x 10 <sup>5</sup>	n. n.	7,6	RT	5,53
A <sub>360</sub>	4,7 x 10 <sup>4</sup>	n. n.	n. n.	2,5 x 10 <sup>-1</sup>	n. n.	9,6	43,3	1,91
Z <sub>408</sub>	1,0 x 10 <sup>6</sup>	2,5 x 10 <sup>3</sup>	2,5 x 10 <sup>3</sup>	2,5 x 10 <sup>3</sup>	n. n.	7,7	RT	5,52
A <sub>408</sub>	3,3 x 10 <sup>4</sup>	n. n.	n. n.	2,5 x 10 <sup>-1</sup>	n. n.	9,4	38,2	2,12
Z <sub>480</sub>	4,9 x 10 <sup>5</sup>	2,5 x 10 <sup>4</sup>	6,0 x 10 <sup>3</sup>	2,5 x 10 <sup>4</sup>	n. n.	7,7	RT	5,54
A <sub>480</sub>	1,8 x 10 <sup>4</sup>	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	9,5	38,9	2,05
Z <sub>504</sub>	7,0 x 10 <sup>5</sup>	3,5 x 10 <sup>3</sup>	2,7 x 10 <sup>3</sup>	1,5 x 10 <sup>4</sup>	n. n.	7,6	RT	5,53
A <sub>504</sub>	5,7 x 10 <sup>4</sup>	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	9,5	43,8	2,20
Z <sub>552</sub>	8,6 x 10 <sup>5</sup>	2,5 x 10 <sup>3</sup>	2,5 x 10 <sup>3</sup>	4,0 x 10 <sup>3</sup>	n. n.	7,6	RT	5,53
A <sub>552</sub>	1,6 x 10 <sup>5</sup>	n. n.	n. n.	4,5 x 10 <sup>0</sup>	n. n.	9,6	35,5	1,35
Z <sub>600</sub>	4,5 x 10 <sup>5</sup>	0,7 x 10 <sup>4</sup>	4,5 x 10 <sup>3</sup>	9,5 x 10 <sup>4</sup>	9,5 x 10 <sup>-1</sup>	7,6	RT	5,51
A <sub>600</sub>	1,8 x 10 <sup>4</sup>	n. n.	n. n.	0,9 x 10 <sup>-1</sup>	n. n.	9,5	n. b.	1,81

n. n.= nicht nachweisbar, n. b. : nicht bestimmt, RT: Raumtemperatur, Z: Zutrag, A: Austrag, GKZ: Gesamtzellzahl, EBA: Enterobacteriaceen, E. coli: Escherichia coli, FKS: Fäkalstreptococcen, Sal.: Salmonellen

Tab. 4.90: Inaktivierung von pathogenen Bakterien bei der Belüftung separierter Schweinegülle (BLR: 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h), MHV: 3 d) bei Maximaltemperaturen von 57,4 – 63,3°C (Versuch 85)

Zeit [h]	GKZ [KBE/ml]	EBA [KBE/ml]	E. coli [KBE/ml]	FKS [KBE/ml]	Sal. [KBE/ml]	pH [ - ]	T [°C]	NH <sub>4</sub> N [g/kg]
Z <sub>0</sub>	n. b.	2,5 x 10 <sup>1</sup>	4,5 x 10 <sup>1</sup>	4,5 x 10 <sup>3</sup>	n. n.	7,7	RT	5,32
Z <sub>24</sub>	n. b.	2,5 x 10 <sup>1</sup>	2,5 x 10 <sup>1</sup>	2,5 x 10 <sup>3</sup>	n. n.	7,8	RT	5,31
A <sub>24</sub>	n. b.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	9,5	39,1	2,62
A <sub>48</sub>	n. b.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	9,5	46,9	1,83
Z <sub>120</sub>	n. b.	2,5 x 10 <sup>2</sup>	2,5 x 10 <sup>2</sup>	2,5 x 10 <sup>4</sup>	n. n.	7,6	RT	5,35
A <sub>120</sub>	n. b.	n. n.	n. n.	0,9 x 10 <sup>-1</sup>	n. n.	9,4	44,5	1,73
A <sub>144</sub>	n. b.	n. n.	n. n.	1,5 x 10 <sup>-1</sup>	n. n.	9,6	41,5	1,59
Z <sub>168</sub>	n. b.	2,5 x 10 <sup>1</sup>	2,5 x 10 <sup>1</sup>	7,5 x 10 <sup>3</sup>	n. n.	7,6	RT	5,34
A <sub>168</sub>	n. b.	n. n.	n. n.	2,5 x 10 <sup>-1</sup>	n. n.	9,5	42,5	1,70
A <sub>192</sub>	n. b.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	9,6	43,3	1,67
Z <sub>216</sub>	n. b.	7,5 x 10 <sup>1</sup>	7,5 x 10 <sup>1</sup>	9,5 x 10 <sup>3</sup>	n. n.	n. b.	n. b.	n. b.
A <sub>216</sub>	n. b.	n. n.	n. n.	0,9 x 10 <sup>-1</sup>	n. n.	9,6	42,3	1,65
Z <sub>288</sub>	n. b.	4,5 x 10 <sup>1</sup>	4,5 x 10 <sup>1</sup>	9,5 x 10 <sup>3</sup>	n. n.	7,6	RT	5,31
A <sub>288</sub>	n. b.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	9,5	44,0	1,94
A <sub>312</sub>	n. b.	n. n.	n. n.	4,5 x 10 <sup>-1</sup>	n. n.	9,7	41,1	1,64

n. n.= nicht nachweisbar, n. b. : nicht bestimmt, RT: Raumtemperatur, Z: Zutrag, A: Austrag, GKZ: Gesamtzellzahl, EBA: Enterobacteriaceen, E. coli: Escherichia coli, FKS: Fäkalstreptococcen, Sal.: Salmonellen

Die Ergebnisse von Versuch 90 (BLR: 15 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h), MHV= 5 d), bei dem Maximaltemperaturen von durchschnittlich 47,9 °C (46,3 – 51,5 °C) erzielt wurden, sind in Tab. 4.91 dargestellt.

Tab. 4.91: Inaktivierung von pathogenen Bakterien bei der Belüftung separierter Schweinegülle (BLR: 15 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h), MHV: 5 d) bei Maximaltemperaturen von 46,3 – 51,5 °C (Versuch 90)

Zeit [h]	GKZ [KBE/ml]	EBA [KBE/ml]	E. coli [KBE/ml]	FKS [KBE/ml]	Sal. [KBE/ml]	pH [ - ]	T [°C]	NH <sub>4</sub> N [g/kg]
Z <sub>0</sub>	3,6 x 10 <sup>8</sup>	0,7 x 10 <sup>2</sup>	0,7 x 10 <sup>-1</sup>	9,5 x 10 <sup>2</sup>	n. n.	8,0	RT	4,63
Z <sub>72</sub>	3,6 x 10 <sup>8</sup>	0,7 x 10 <sup>2</sup>	0,7 x 10 <sup>-1</sup>	9,5 x 10 <sup>2</sup>	n. n.	8,0	RT	4,62
A <sub>72</sub>	3,9 x 10 <sup>5</sup>	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	9,7	43,9	1,83
Z <sub>96</sub>	3,3 x 10 <sup>8</sup>	2,5 x 10 <sup>1</sup>	4,5 x 10 <sup>-1</sup>	4,5 x 10 <sup>2</sup>	n. n.	8,0	RT	4,56
A <sub>96</sub>	1,6 x 10 <sup>6</sup>	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	9,5	43,5	1,80
Z <sub>168</sub>	5,9 x 10 <sup>8</sup>	1,5 x 10 <sup>1</sup>	4,5 x 10 <sup>-1</sup>	2,5 x 10 <sup>3</sup>	n. n.	8,1	RT	4,58
A <sub>168</sub>	4,3 x 10 <sup>5</sup>	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	9,6	44,6	1,70
Z <sub>192</sub>	1,3 x 10 <sup>8</sup>	4,5 x 10 <sup>1</sup>	0,9 x 10 <sup>-1</sup>	4,5 x 10 <sup>2</sup>	n. n.	n. b.	n. b.	n. b.
A <sub>192</sub>	4,4 x 10 <sup>5</sup>	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	9,6	42,9	1,72
Z <sub>264</sub>	6,9 x 10 <sup>8</sup>	1,4 x 10 <sup>2</sup>	0,9 x 10 <sup>-1</sup>	4,5 x 10 <sup>2</sup>	n. n.	7,9	RT	4,49
A <sub>264</sub>	4,5 x 10 <sup>5</sup>	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	9,5	43,9	1,66

n. n.= nicht nachweisbar, n. b. : nicht bestimmt, RT: Raumtemperatur, Z: Zutrag, A: Austrag, GKZ: Gesamtzellzahl, EBA: Enterobacteriaceen, E. coli: Escherichia coli, FKS: Fäkalstreptococcen, Sal.: Salmonellen

Der Versuch 75 ergab bei Maximaltemperaturen (die nicht den Temperaturen zum Zeitpunkt der Probenahme entsprachen sondern vorher auftraten) von 50,2 – 56,0 °C eine deutliche Abnahme der Gesamtzellzahl von durchschnittlich 93 % (83 – 97 %) und eine vollständige Inaktivierung von Enterobakterien sowie von E. coli. Fäkalstreptococcen wurden um mindestens 99,9 % reduziert, in vielen Fällen sogar vollständig inaktiviert. Salmonellen waren in der Gülle im Regelfall nicht enthalten.

Bei Versuch 85, bei dem Maximaltemperaturen von 57,4 – 63, 3°C auftraten, wurde ebenfalls eine vollständige Inaktivierung von Enterobakterien und E. coli erreicht. Fäkalstreptococcen wurden um mehr als 99,99 %, in vielen Fällen vollständig inaktiviert. Salmonellen waren auch bei Versuch 85 in der Gülle nicht nachzuweisen.

Bei Versuch 90 lagen die Maximaltemperaturen bei durchschnittlich 47,9 °C (46,3 – 51,5 °C). Im Gegensatz zu Versuch 75 und 85 betrug die mittlere hydraulische Verweilzeit bei diesem Versuch 5 d. Die Gesamtzellzahl wurde bei diesem Versuch um mehr als 99 % reduziert. Enterobakterien und E. coli, aber auch Fäkalstreptococcen konnten im Austrag zu keinem Zeitpunkt mehr nachgewiesen werden. Salmonellen waren in der Rohgülle nicht nachweisbar.

Wie die Versuche 75, 85 und 90 gezeigt haben, waren pathogene Mikroorganismen in der separierten Rohgülle oft nur in geringen Konzentrationen nachzuweisen oder sie fehlten



völlig. Um die entseuchende Wirkung des Verfahrens auch bei hohen Konzentrationen an pathogenen Organismen beurteilen zu können, wurde ein weiterer Versuch (V 107) durchgeführt, bei dem hohe Keimkonzentrationen in Ampullen (Amp) und mittels Keimträgern (KT) in den Bioreaktor eingebracht wurden. Zur Herstellung der Keimträger wurde die frisch hergestellte Mikroorganismen-Suspension durch einen Membranfilter mit einer Porengröße von  $0,45\ \mu\text{m}$  filtriert. Die beimpfte Membran wurde im Brutraum 5 min lang angetrocknet. Nach der Trocknung wurde die keimtragende Membran beidseitig mit einem Membranfilter der Porengröße  $0,2\ \mu\text{m}$  abgedeckt und das so entstandene „Filtersandwich“ in den Keimträger eingeschraubt.

Bei diesem Versuch wurden Keimträger und Ampullen mit *Salmonella enteritidis* und *Salmonella senftenberg* sowie Ampullen mit Fäkalstreptococcen eingesetzt. Durch den Einsatz der Keimträger bestand direkter Kontakt zur Gülle, so dass die entseuchende Wirkung nicht nur auf die Temperatureinwirkung, sondern auch auf Parameter wie Ammoniak und andere zurückgeführt werden konnte. Bei den Ampullen beschränkte sich die entseuchende Wirkung allein auf die Temperatureinwirkung. Die Salmonellen, die mit einer Startkonzentration von  $2,7 \times 10^8$  KBE/ml (*Sal. enteritidis*) bzw.  $2,5 \times 10^8$  KBE/ml (*Sal. senftenberg*) eingesetzt wurden, waren sowohl auf den Keimträgern als auch auf den Ampullen nach 5 h nicht mehr nachweisbar (Tab. 4.92). Demnach wurden beide Organismen bei Temperaturen von 49 bis 51 °C vollständig inaktiviert. Bei den Keimträgern verlief die Inaktivierung tendenziell etwas schneller ab als bei den Ampullen. Für die Inaktivierung von Fäkalstreptococcen waren längere Einwirkzeiten und auch höhere Temperaturen erforderlich. Eine starke Abnahme der Fäkalstreptococcen trat bei Temperaturen über 50 °C auf. Mit einer vorgesehenen Mindestverweilzeit von 24 h (quasi-kontinuierlicher Betrieb) kann jedoch von einer sehr weitgehenden Inaktivierung ausgegangen werden.

Die virologischen Untersuchungen mit dem Aujeszky- und dem ECBO-Virus bestätigen die entseuchende Wirkung des aerob-thermophilen Verfahrens auch für relevante Viren (Tab. 4.93). Die gilt insbesondere für das Aujeszky-Virus, das bei Schweinen die Aujeszky'sche Krankheit hervorruft und erhebliche wirtschaftliche Einbußen für die Tierhalter bedeuten kann. Das ECBO-Virus eignet sich wegen seiner hohen Stabilität gegenüber chemischen und physikalischen Einflüssen gut für Tenazitätsuntersuchungen, ist jedoch nur gering pathogen.

Das AKV-Virus war nach spätestens 8 h Versuchszeit bei Temperaturen um 50 °C vollständig inaktiviert. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass durch Einsatz von Ampullen kein Substratkontakt bestand und die entseuchende Wirkung allein durch thermische Einflüsse hervorgerufen wurde. Nach den vorliegenden Ergebnissen ist bei der quasi-kontinuierlichen Betriebsweise eine sichere Abtötung des AKV-Virus zu erreichen.

Bei thermotoleranteren Viren wie dem ECBO-Virus waren längere Einwirkzeiten und auch höhere Temperaturen zur vollständigen Abtötung erforderlich. Eine starke Reduzierung dieser Viren wurde bei Temperaturen oberhalb von 51 °C beobachtet.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die aerob-thermophile Belüftung bei Mindestverweilzeiten von 24 h, in denen eine Temperatur von 50 °C erreicht wird, eine sichere Abtötung pathogenen Bakterien gewährleistet. Bei den untersuchten Viren gelang

eine vollständige Inaktivierung bei Temperaturen von 44,8 – 54,7 °C innerhalb von 6 h (Aujeszky-Virus) bzw. innerhalb von 10 h bei 44,8 – 60,9 °C (ECBO-Viren).

Tab. 4.92: Inaktivierung von Salmonellen und Fäkalstreptococcen bei der Belüftung separierter Schweinegülle bei quasi-kontinuierlicher Betriebsweise

Zeit [h]	Sal. enteritidis [KBE/ml]		Sal. senftenberg [KBE/ml]		FKS [KBE/ml] Amp	pH, Gülle [ - ]	T, Gülle [°C]
	KT	Amp	KT	Amp			
2	$1,5 \times 10^6$	$2,5 \times 10^6$	$9,5 \times 10^7$	$9,5 \times 10^6$	$4,5 \times 10^3$	8,67	44,8
3	$4,0 \times 10^4$	$1,5 \times 10^2$	$4,5 \times 10^4$	$3,0 \times 10^3$	$1,5 \times 10^3$	8,72	47,0
4	$2,5 \times 10^1$	$2,5 \times 10^2$	$9,5 \times 10^0$	$2,5 \times 10^2$	$9,5 \times 10^2$	8,78	49,1
5	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	$2,5 \times 10^1$	8,85	51,2
6	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	$4,5 \times 10^0$	8,92	53,0
7	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	$9,5 \times 10^{-1}$	8,96	54,7
8	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	$2,5 \times 10^{-1}$	8,98	56,5
11	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	$0,9 \times 10^{-1}$	9,11	60,9
15	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	9,28	62,5
24	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	9,31	64,3

KBE= Kolonie bildende Einheiten, KT= Keimträger, Amp= Ampulle, n. n.= nicht nachweisbar, FKS= Fäkalstreptococcen

Tab. 4.93: Inaktivierung von Aujeszky- und ECBO-Viren bei der Belüftung separierter Schweinegülle bei quasi-kontinuierlicher Betriebsweise

Zeit [h]	T [°C]	Titer AKV [KID <sub>50</sub> /ml]	Titer ECBO [KID <sub>50</sub> /ml]
Nullprobe	0	$2,2 \times 10^6$	$1,3 \times 10^{10}$
1	44,8	$4 \times 10^7$	
2	47,0	n. b.	
4	51,2	$4 \times 10^2$	$1,3 \times 10^9$
6	54,7	n. b.	
8	58,2	n. n.	$4 \times 10^2$
10	60,9	n. n.	n. n.
14	62,5	n. n.	n. n.
18	61,9	n. n.	n. n.
24	64,3	n. n.	n. n.

AKV= Aujeszky-Virus, Stamm Phylaxia LYO 301 D,

ECBO= Rinderenterovirus, Stamm LCR-4, KID= Kulturinfektiöse Dosis

n. b. = nicht bestimmt, n. n. = nicht nachweisbar

#### 4.4 Demonstrationsanlage

Auf der Grundlage der Ergebnisse aus den Versuchen im halbtechnischen Maßstab wurde eine Demonstrationsanlage mit den wesentlichen Verfahrensschritten Separation, aerob-thermophile Belüftung und Dekantierung in Cloppenburg - Stapelfeld errichtet (Kap. 3.2.2.).

##### 4.4.1 Rohgüllezusammensetzung

Die von den Landwirten zur Demonstrationsanlage angelieferte Rohgülle wies erhebliche Konzentrationsschwankungen bei allen untersuchten Parametern auf. Die Ergebnisse beruhen auf 223 Tagesmischproben verschiedener Anlieferer (Tab. 4.94).

Tab. 4.94: Zusammensetzung und Schwankungsbreite der zur Demonstrationsanlage angelieferten Rohgülle (n= 223)

Parameter	Minimum [kg/t]	Maximum [kg/t]	Mittel [kg/t]	Mittel [%TR]
TR	16,3	145,1	63,2	
OTR	9,9	105,2	44,8	70,9
CSB	19,6	134,2	61,7	97,6
BSB <sub>5</sub>	1,1	51,0	12,1	19,1
NH <sub>4</sub> N	2,26	7,39	4,50	7,1
Nges	3,09	9,73	5,90	9,3
Pges	0,40	2,40	1,30	2,1

##### 4.4.2 Separation

Die Untersuchungen zur Separation von Gülle mit dem FAN-Separator haben gezeigt, dass die Spaltweite des Siebkorb im Regelfall keinen entscheidenden Einfluss auf die Massen- und Nährstoffabtrennung hatte (Abb. 4.85 – 4.88). Dies lässt sich mit dem Abstand der Pressschnecke vom Siebkorb erklären, wo es zur Ausbildung eines Siebfilters kommt, der für das Abtrennverhalten von großer Bedeutung ist. Lediglich bei stark verdünnten Güllen kann der Einsatz von Siebkörben mit einer Spaltweite von 0,25 mm sinnvoll sein. Die Verringerung des Siebspaltes wirkte sich jedoch in starkem Maße auf den Durchfluss aus, der bei einer TR-Konzentration von 70 – 76 g/kg von 15 m³/h (1,0 mm) über 8,7 m³/h (0,5 mm) auf 5,3 m³/h (0,25 mm) fiel. Bei gleichem Siebspaltdurchmesser von 1 mm sank der Durchfluss mit steigender TR-Konzentration von 24 m³/h (TR= 32,1 kg/t) über 20 m³/h (TR= 51,8 kg/t) auf 15 m³/h (TR= 76,1 kg/t) .

Die erzielbare Massenabtrennung war in erster Linie eine lineare Funktion der TR-Konzentration im Zulauf (Abb. 4.85) und nicht von der Siebspaltweite abhängig. Bei Güllen mit einer TR-Konzentration unter 30 kg/t ist nach den vorliegenden Ergebnissen keine Massenabtrennung mehr möglich.

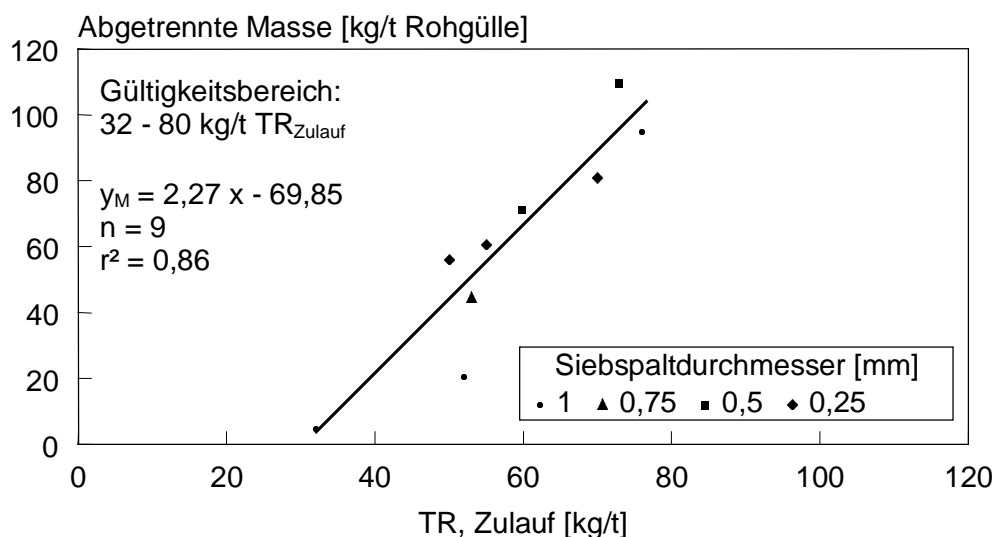


Abb. 4.85: Massenabtrennung in Abhängigkeit der TR-Konzentration der Rohgülle bei verschiedenen Siebspaltweiten

Die Abtrennung von Feststoffen (Abb. 4.86) war auch von der TR-Konzentration der Rohgülle im Zulauf abhängig und stieg linear mit dieser an. Der Wirkungsgrad der TR-Abtrennung in Hinblick auf eine Konzentrationsminderung bewegte sich rechnerisch zwischen 12,5 % (TR<sub>Rohgülle</sub> = 40 g/kg) und 31,2 % (TR<sub>Rohgülle</sub> = 100 g/kg).

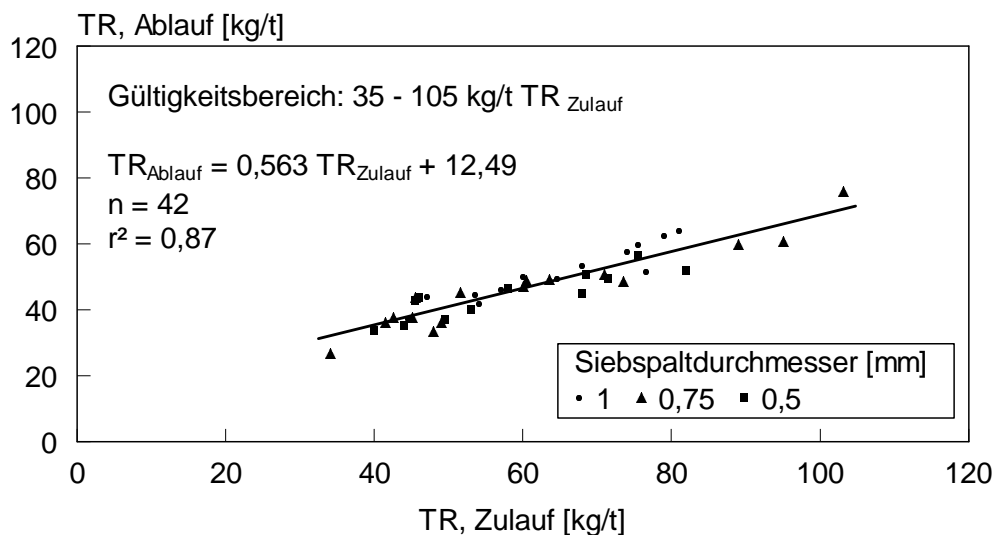


Abb. 4.86: Einfluss der TR-Konzentration der Rohgülle auf die TR-Ablaufkonzentration bei der Separation mit unterschiedlichen Siebspaltweiten

Mit der mechanischen Separation konnte in Hinblick auf Gesamtstickstoff nur eine sehr geringe Konzentrationsminderung von maximal 3 % (N<sub>ges</sub><sub>Rohgülle</sub>: 10 kg/t) erzielt werden (Abb. 4.87). Diese geringe Wirkung ist auf das NH<sub>4</sub>N/N<sub>ges</sub>-Verhältnis zurückzuführen, dass in der Rohgülle bei etwa 0,8 lag. Wenn nur 20 % des Stickstoffs organisch gebunden

vorliegen (80 % als Ammonium) und die Konzentrationsminderung, bezogen auf Nges bei maximal 3 % lag, wurden unter diesen Bedingungen dementsprechend maximal 15 % des organisch gebundenen Stickstoffs abgetrennt.

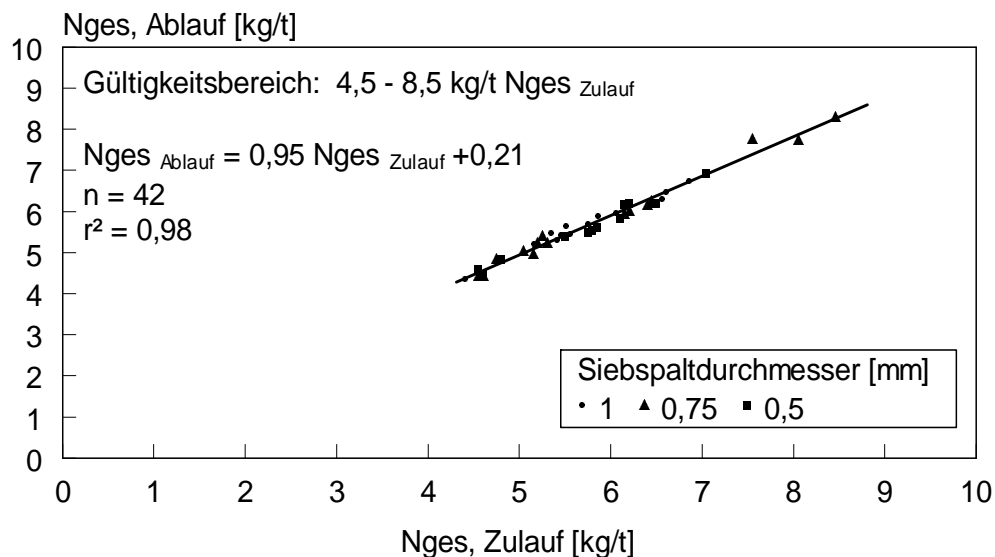


Abb. 4.87: Einfluss der Nges-Konzentration der Rohgülle auf die Nges-Ablaufkonzentration bei der Separation mit unterschiedlichen Siebspaltweiten

Die Abtrennung von Gesamtphosphat (Abb. 4.88) war wiederum von der Zulaufkonzentration abhängig und stieg linear mit dieser an. Die Wirkungsgrade der Phosphatabtrennung bewegten sich rechnerisch zwischen 3 % (Zulaufkonzentration: 0,5 kg/t) und 14 % (Zulaufkonzentration: 2,5 kg/t).

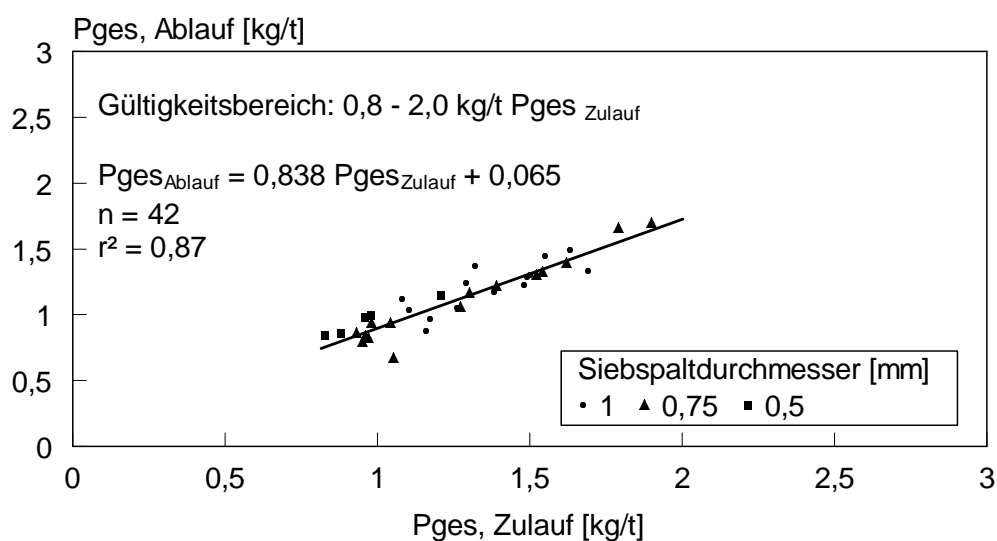


Abb. 4.88: Einfluss der Pges-Konzentration der Rohgülle auf die Pges-Ablaufkonzentration bei der Separation mit unterschiedlichen Siebspaltweiten

Der Abscheidegrad ( $y_s$ ) bei der Separation kann mit der Formel

$$y_s = [(c_{zu} \times m_{zu}) - (c_{aus} \times m_{aus}) / (c_{zu} \times m_{zu})] \times 100$$

berechnet werden, wobei  $c$  die jeweilige Konzentration des betrachteten Parameters und  $m$  die dazugehörige Masse darstellt.

Unter Verwendung der Funktionen

- $y_M = 2,27 \times - 69,85$  (Massenabtrennung, Abb. 4.85),
- $y_{TR} = 0,563 \times + 12,49$  (Konzentrationsminderung Feststoff, Abb. 4.86),
- $y_{Nges} = 0,95 \times + 0,21$  (Konzentrationsminderung Nges, Abb. 4.87) und
- $y_{Pges} = 0,838 \times + 0,065$  (Konzentrationsminderung Pges, Abb. 4.88)

kann der durch die Separation erzielbare Abscheidegrad einer beliebigen Mastschweinegülle für die Parameter Feststoff, Nges und Pges berechnet werden (Tab. 4.95). Die für diese Berechnung zugrunde gelegten Daten beruhen auf der gemittelten Güllezusammensetzung (Tab. 4.94).

Tab. 4.95: Theoretische Abscheidegrade für Fest- und Nährstoffe bei der Separation von Mastschweinegülle

Konzentration [kg/t]						Masse [kg]		Abscheidegrad [%]		
TR		Nges		Pges						
Ein	Aus	Ein	Aus	Ein	Aus	Ein	Aus	TR	Nges	Pges
40	35,0	3,72	3,74	0,84	0,77	1000	979,0	14,3	1,6	10,3
60	46,3	5,58	5,51	1,26	1,12	1000	933,7	27,9	7,8	17,0
63,2	48,1	5,90	5,82	1,30	1,15	1000	926,4	29,5	8,6	18,0
80	57,5	7,44	7,28	1,68	1,47	1000	888,3	36,2	13,1	22,3
100	68,8	9,30	9,05	2,10	1,82	1000	842,9	42,0	18,0	26,9

Mit der Separation kann somit eine deutliche Reduktion des Trockenrückstandes erreicht werden, während die Nges-Abtrennung mit 1,6 bis 18 % nur einen geringen Wirkungsgrad aufweist. Die Phosphorabtrennung liegt mit Wirkungsgraden von 10,3 bis 26,9 % deutlich über den Werten der möglichen Stickstoffabtrennung bei vergleichbaren TR-Konzentrationen. Die Separation beeinflusst das N:TR-Verhältnis in erheblichen Maße. Während es in Rohgülle bei durchschnittlich 9,3 % liegt, steigt es in der separierten Gülle von 10,7 % ( $TR_{Rohgülle}$ : 40 g/kg) auf 13,2 % ( $TR_{Rohgülle}$ : 100 g/kg). Bei einer durchschnittlich zusammengesetzten Schweinegülle ( $TR$ = 63,2 kg/t,  $Nges$ = 5,9 kg/t,  $Pges$ = 1,3 kg/t) ist nach den vorliegenden Ergebnissen von einer Massenabtrennung von 7,4 %, einem TR-Abscheidegrad von 29,5 %, einem Nges-Abscheidegrad von 8,6 % und einem Pges-Abscheidegrad von 18 % auszugehen.

#### 4.4.3 Aerob-thermophile Belüftung

Die Ergebnisse der über jeweils mehrere Wochen gelaufenen Versuche bei verschiedenen hydraulischen Verweilzeiten und Belüftungsraten sind in den Tab. 4.96 – 4.101 zusammengefasst. Die dargestellten Wirkungsgrade wurden bei jeder Beprobung aus dem Zu- und Austrag errechnet und aus der Gesamtzahl der Einzelwerte gemittelt. Belüftungsraten von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) konnten aufgrund technischer Unzulänglichkeiten des Entschäumers, die zu einem Schaumdurchtritt führten, nicht dauerhaft getestet werden. Auch eine Absenkung des Reaktorfüllvolumens von 100 m<sup>3</sup> auf 70 m<sup>3</sup> führte nicht zu betriebsstabilen Zuständen.

Bei einer Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) und einer hydraulischen Verweilzeit von 3 d (Versuch A) bewegten sich die erzielten Maximaltemperaturen zwischen 45 und 50 °C, die pH-Werte im Austrag lagen zwischen 9,4 und 9,9. Im Vergleich zu den halbtechnischen Versuchen (Tab. 4.97) fällt auf, dass unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Konzentrationen der betrachteten Parameter im Zutrag keine auffälligen Unterschiede beim Kohlenstoffabbau und der Stickstoffelimination feststellbar sind, wie Abb. 4.89 bestätigt. Der geringe Wirkungsgrad beim BSB<sub>5</sub>-Abbau beruht auf der vergleichsweise geringen Konzentration im Zutrag sowie der unvermeidbaren endogenen Atmung der Mikroorganismen in der belüfteten Gülle.

Tab. 4.96: Kohlenstoffabbau und Stickstoff-Elimination bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) und einer hydraulischen Verweilzeit von 3 Tagen im Demonstrationsmaßstab

Versuchs – Nr. : A				
Versuchsbedingungen:				
Belüftungsrate (BLR)= 10 m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·h), Mittlere hydraulische Verweilzeit (MHV): 3 Tage				
Parameter		Mittel	Minimum	Maximum
TR	Zutrag [g/kg]	51,6	43,2	62,6
	Austrag [g/kg]	49,3	29,9	72,0
	WG [%]	4,5	-17,4	42,3
CSB	Zutrag [g/kg]	54,2	44,1	67,6
	Austrag [g/kg]	38,0	22,7	55,1
	WG [%]	30,1	3,8	58,5
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	10,9	7,5	13,6
	Austrag [g/kg]	3,3	2,6	4,4
	WG [%]	68,5	59,8	76,9
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	4,5	4,1	5,0
	Austrag [g/kg]	3,0	2,5	3,5
	WG [%]	32,4	20,9	46,3
Nges	Zutrag [g/kg]	5,4	4,7	6,2
	Austrag [g/kg]	4,5	3,5	5,5
	WG [%]	16,5	7,6	31,9

WG= Wirkungsgrad

Tab. 4.97: Vergleich des Kohlenstoffabbaus und der Stickstoffelimination bei der Belüftung separierter Schweinegülle im halbtechnischen Maßstab und im Demonstrationsmaßstab bei einer Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) und einer hydraulischen Verweilzeit von 3 Tagen

Parameter	Mittelwerte	Versuch 70	Versuch 107	Versuch A
TR	Zutrag [g/kg]	60,7	75,1	51,6
	Austrag [g/kg]	55,0	66,4	49,3
	WG [%]	10,1	11,5	4,5
CSB	Zutrag [g/kg]	67,4	112,6	54,2
	Austrag [g/kg]	49,6	74,6	38,0
	WG [%]	26,2	33,8	30,1
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	17,8	38,4	10,9
	Austrag [g/kg]	3,4	10,2	3,3
	WG [%]	81,1	73,9	68,5
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	5,21	7,47	4,5
	Austrag [g/kg]	3,46	4,32	3,0
	WG [%]	33,6	42,1	32,4
Nges	Zutrag [g/kg]	6,69	9,70	5,4
	Austrag [g/kg]	5,34	6,92	4,5
	WG [%]	20,2	28,6	16,5

WG= Wirkungsgrad

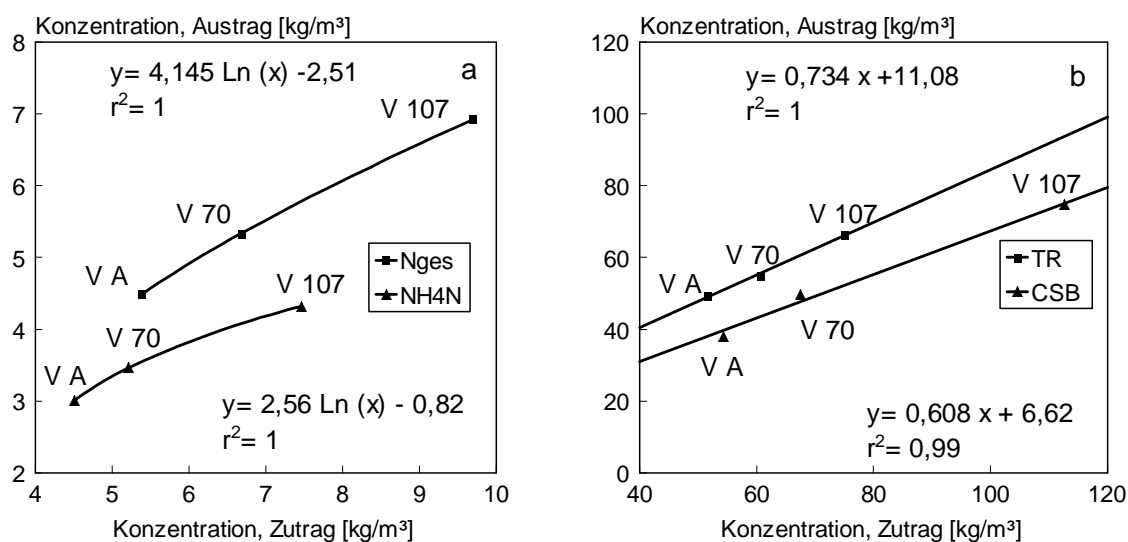


Abb. 4.89 a und b: Vergleich der Konzentrationen verschiedener Parameter im Zu- und Austrag bei der Belüftung von Gülle im halbtechnischen Maßstab und im Demonstrationsmaßstab bei einer hydraulischen Verweilzeit von 3 d und einer Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Konzentrationen im Zutrag



Die Verkürzung der hydraulischen Verweilzeit von 3 (Tab. 4.96, Versuch A ) auf 2 Tage (Tab. 4.98, Versuch B) führte wie auch bei den halbtechnischen Versuchen zu einer deutlichen Verschlechterung des Wirkungsgrades beim Kohlenstoffabbau und bei der N-Elimination. Besonders die CSB-Elimination sank bei vergleichbaren Zutragskonzentrationen von 30,1 % auf 16,9 %. Der BSB<sub>5</sub>-Abbau lag demgegenüber in einer vergleichbaren Größenordnung. Dies ist einerseits auf die leichte Abbaubarkeit und andererseits auf die geringen Zutragskonzentrationen zurückzuführen. Die Ammonium-Elimination sank von 32,4 % auf 22,1 %, die Nges-Elimination von 16,5 % auf 9,7 %.

Tab. 4.98: Kohlenstoffabbau und Stickstoff-Elimination bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) und einer hydraulischen Verweilzeit von 2 Tagen im Demonstrationsmaßstab

Versuchs – Nr. : B				
Versuchsbedingungen:				
Belüftungsrate (BLR)= 10 m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> ·h), Mittlere hydraulische Verweilzeit (MHV): 2 Tage				
Parameter		Mittel	Minimum	Maximum
TR	Zutrag [g/kg]	50,7	40,0	52,7
	Austrag [g/kg]	52,6	41,9	57,5
	WG [%]	-3,7	-34,4	16,5
CSB	Zutrag [g/kg]	50,5	41,7	54,8
	Austrag [g/kg]	41,8	36,0	50,8
	WG [%]	16,9	0,8	30,4
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	10,9	8,0	13,9
	Austrag [g/kg]	3,1	2,4	4,3
	WG [%]	70,6	58,2	82,7
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	4,5	4,3	4,7
	Austrag [g/kg]	3,5	3,2	3,8
	WG [%]	22,1	16,3	27,0
Nges	Zutrag [g/kg]	5,7	5,3	6,2
	Austrag [g/kg]	5,1	4,8	5,4
	WG [%]	9,7	2,6	16,3

WG= Wirkungsgrad

Unter Berücksichtigung der Zutragskonzentrationen ergaben die Versuche im halbtechnischen wie im Demonstrationsmaßstab bei einer Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) und einer hydraulischen Verweilzeit von 2 d vergleichbare Ergebnisse (Tab. 4.99).

Hydraulische Verweilzeiten von 4 d (Tab. 4.100, Versuch C) ergaben einen weitgehenden BSB<sub>5</sub>-Abbau (81,3 %) sowie eine deutlich verbesserte NH<sub>4</sub>N-Elimination (47 %) und Nges-Elimination (29,6 %).

Tab. 4.99: Vergleich des Kohlenstoffabbaus und der Stickstoffelimination bei der Belüftung separierter Schweinegülle im halbtechnischen Maßstab und im Demonstrationsmaßstab bei einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  und einer hydraulischen Verweilzeit von 2 Tagen

Parameter	Mittelwerte	Versuch 62	Versuch 71	Versuch B
TR	Zutrag [g/kg]	51,2	56,6	50,7
	Austrag [g/kg]	50,2	52,9	52,6
	WG [%]	1,5	6,3	-3,7
CSB	Zutrag [g/kg]	49,4	66,2	50,5
	Austrag [g/kg]	42,1	47,5	41,8
	WG [%]	14,3	28,1	16,9
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	9,3	18,0	10,9
	Austrag [g/kg]	4,0	5,7	3,1
	WG [%]	56,2	68,3	70,6
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	4,99	4,79	4,5
	Austrag [g/kg]	3,64	3,42	3,5
	WG [%]	27,0	28,4	22,1
Nges	Zutrag [g/kg]	6,20	5,96	5,7
	Austrag [g/kg]	5,06	5,26	5,1
	WG [%]	18,3	11,8	9,7

WG= Wirkungsgrad

Tab. 4.100: Kohlenstoffabbau und Stickstoff-Elimination bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  und einer hydraulischen Verweilzeit von 4 Tagen im Demonstrationsmaßstab

Versuchs – Nr. : C				
Versuchsbedingungen:				
Belüftungsrate (BLR)= $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ , Mittlere hydraulische Verweilzeit (MHV): 4 Tage				
Parameter		Mittel	Minimum	Maximum
TR	Zutrag [g/kg]	55,9	40,6	55,6
	Austrag [g/kg]	53,8	43,1	58,1
	WG [%]	3,8	-12,4	19,6
CSB	Zutrag [g/kg]	54,1	48,0	61,5
	Austrag [g/kg]	40,6	34,4	47,3
	WG [%]	24,8	10,4	41,9
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	13,3	11,2	18,6
	Austrag [g/kg]	2,5	1,2	4,2
	WG [%]	81,3	71,5	89,8
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	5,7	4,7	6,9
	Austrag [g/kg]	3,0	2,1	3,5
	WG [%]	47,0	35,4	56,7
Nges	Zutrag [g/kg]	6,7	5,8	7,6
	Austrag [g/kg]	4,9	3,6	5,6
	WG [%]	29,6	19,2	40,0

WG= Wirkungsgrad

Tab. 4.101: Vergleich des Kohlenstoffabbaus und der Stickstoffelimination bei der Belüftung separierter Schweinegülle im halbtechnischen Maßstab und im Demonstrationsmaßstab bei einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  und einer hydraulischen Verweilzeit von 4 Tagen

Parameter		Versuch 63	Versuch 69	Versuch C
TR	Zutrag [g/kg]	50,9	63,9	55,9
	Austrag [g/kg]	47,4	56,1	53,8
	WG [%]	10,4	12,5	3,8
CSB	Zutrag [g/kg]	52,3	72,7	54,1
	Austrag [g/kg]	40,5	50,3	40,6
	WG [%]	24,9	31,0	24,8
BSB <sub>5</sub>	Zutrag [g/kg]	12,4	20,4	13,3
	Austrag [g/kg]	2,0	3,3	2,5
	WG [%]	84,0	83,2	81,3
NH <sub>4</sub> N	Zutrag [g/kg]	4,87	5,21	5,7
	Austrag [g/kg]	3,79	3,39	3,0
	WG [%]	23,1	34,8	47,0
Nges	Zutrag [g/kg]	5,79	6,71	6,7
	Austrag [g/kg]	4,76	5,22	4,9
	WG [%]	18,4	22,2	29,6

WG= Wirkungsgrad

Ein Vergleich der halbtechnischen Versuche mit dem Versuch im Demonstrationsmaßstab (Tab. 4.101) zeigt, dass der Kohlenstoffabbau in einer vergleichbaren Größenordnung lag. Die deutlichen Unterschiede bei der NH<sub>4</sub>N- und Nges-Elimination sind wahrscheinlich auf die unterschiedlichen Nährstoffverhältnisse (N:TR) zurückzuführen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bei vergleichbaren Bedingungen (Belüftungsrate, hydraulische Verweilzeit) die Ergebnisse der Versuche im Demonstrationsmaßstab im wesentlichen mit den Ergebnissen der Versuche im halbtechnischen Maßstab übereinstimmten. Werden nun die bei den verschiedenen hydraulischen Verweilzeiten erzielten Eliminationsgrade für Ammonium und Gesamtstickstoff gemittelt und gegen die hydraulische Verweilzeit aufgetragen, so ergeben sich eindeutige Zusammenhänge (Abb. 4.90).

Die Stickstoffelimination stieg mit der hydraulischen Verweilzeit an und erreichte bei Verweilzeiten von 3 – 4 Tagen ihr Maximum. Bei Belüftungsraten von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  wurden unter diesen Bedingungen 30 – 40 % des Ammoniumstickstoffs und 20 – 25 % des Gesamtstickstoffs eliminiert. Im Vergleich zu den Ergebnissen mit einer Belüftungsrate von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  führte die Halbierung der Belüftungsrate auch zu einer Halbierung der N-Elimination (Abb. 4.91 ).

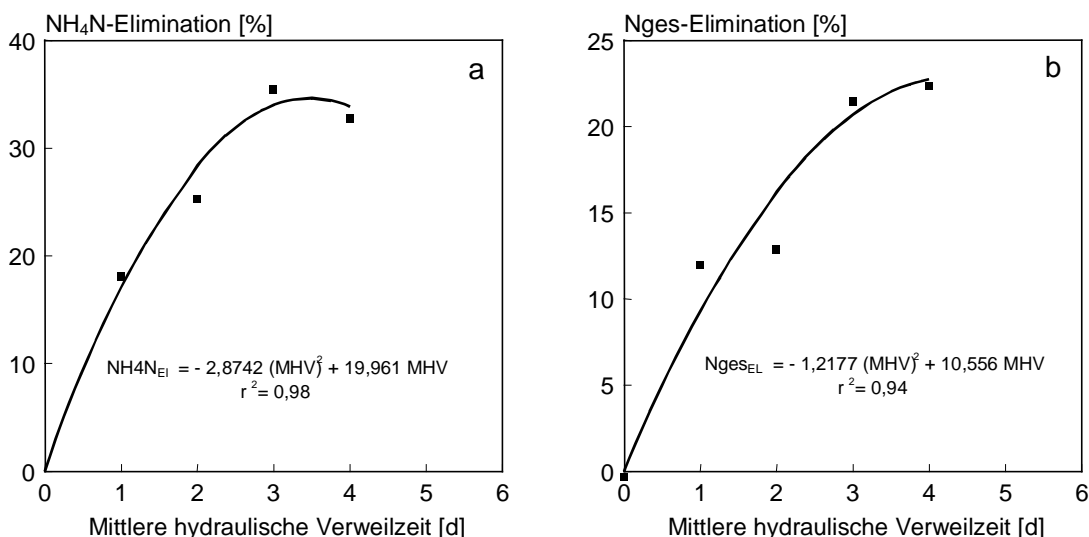


Abb. 4.90 a, b: Einfluss der hydraulischen Verweilzeit auf die  $\text{NH}_4\text{N}$ - und  $\text{N}_{\text{ges}}$ -Elimination bei der Belüftung separierter Schweinegülle mit einer Belüftungsrate von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

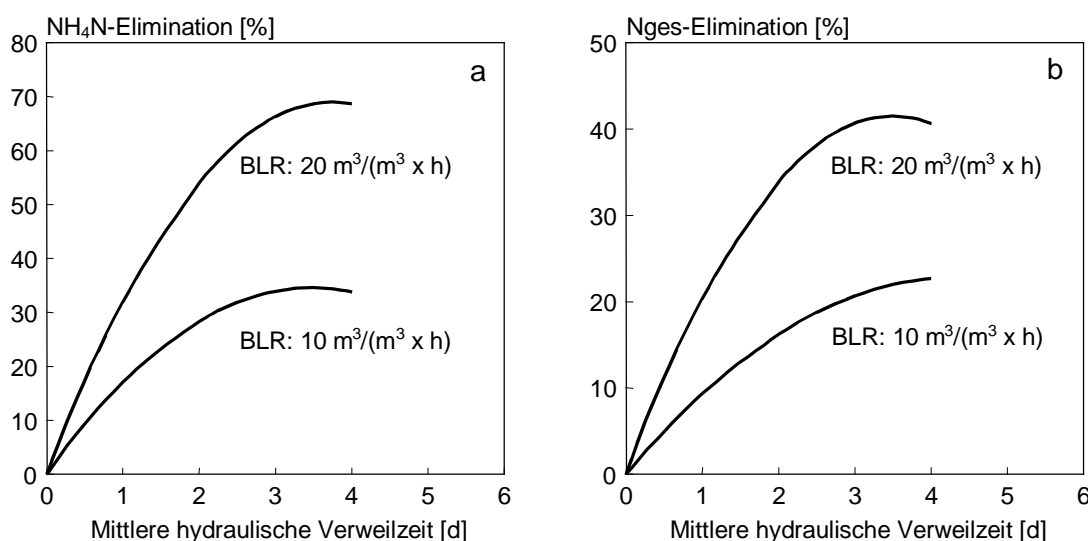


Abb. 4.91 a, b: Einfluss der Belüftungsrate und der hydraulischen Verweilzeit auf die  $\text{NH}_4\text{N}$ - und  $\text{N}_{\text{ges}}$ -Elimination bei der Belüftung separierter Schweinegülle

#### 4.4.4 Abgaswäsche

Aufgrund der quasikontinuierlichen Betriebsweise bewegten sich die Ammoniakkonzentrationen im Abgas zwischen  $1500 \text{ mg/m}^3$  (nach Wiederauffüllung) und  $4500 \text{ mg/m}^3$  (vor Wiederauffüllung) und lagen im Mittel bei  $2100 \text{ mg/m}^3$ . Sie stiegen zeitversetzt mit der Temperatur an und erreichten bei  $50^\circ\text{C}$  maximale Werte. Im Reingas der zweistufigen Wäsche wurden Ammoniakkonzentrationen von  $0,45 - 9,2 \text{ mg/m}^3$  bzw.  $3,5 \text{ mg/m}^3$  im Mittel gemessen ( $n = 18$ ). Der Gesamtwirkungsgrad der Wäsche lag im Mittel bei  $99,8\%$ .

Die bei der Wäsche gewonnene Ammoniumsulfat-Lösung wies bei pH-Werten von 7,5 – 8 Ammoniumkonzentrationen von 71,5 – 89,5 kg/t bzw. 78,4 kg/t im Mittel ( $n = 34$ ) auf. Bedingt durch einen geringen Tröpfchendurchtritt aus dem Entschäumer lag die durchschnittliche CSB-Konzentration in der Ammoniumsulfat-Lösung bei 160 g/t, wobei die Schwankungen zwischen 90 und 290 g/t auftraten.

#### 4.4.5 Dekantierung

Nach der aerob-thermophilen Belüftung wurde die nährstoffreduzierte und entseuchte Gülle einer Dekantierung unterzogen, um Feststoffe und vor allem ungelöstes Calciumphosphat und organisch gebundenes Phosphat abzutrennen. Die mit der Dekantierung erzielbare Massenabtrennung war von der TR-Konzentration der Gülle im Zulauf abhängig und stieg mit dieser linear an (Abb. 4.93). Die Massenabtrennung bewegte sich zwischen 2,5 % (TR= 30 kg/t) und 9,7 % (TR= 60 g/kg) bei einem Güledurchsatz von 12 m<sup>3</sup>/h (TR= 30 kg/t) bzw. 10 m<sup>3</sup>/h (TR= 60 kg/t).

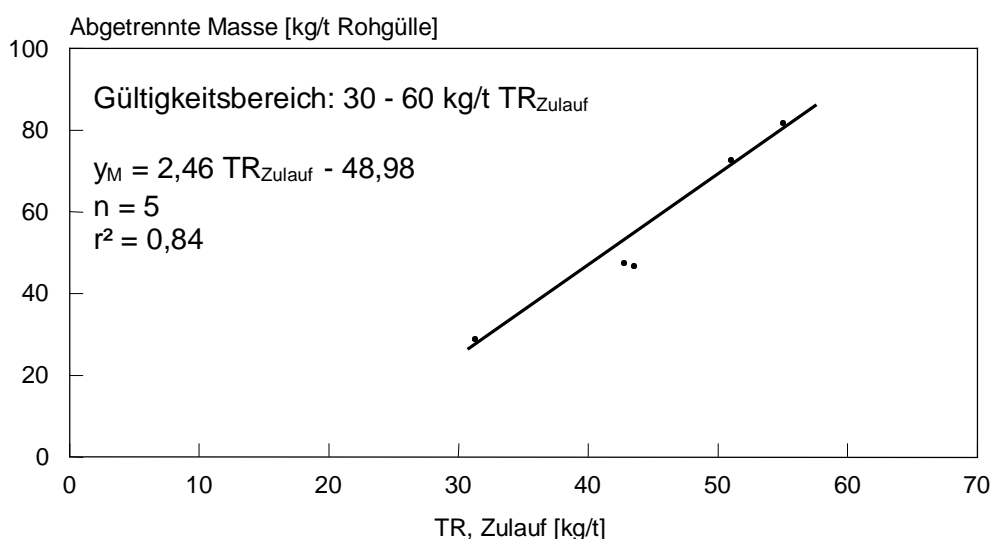


Abb. 4.93: Massenabtrennung bei der Dekantierung in Abhängigkeit von der TR-Konzentration des Zulaufs

Die durch die Dekantierung erzielbare Konzentrationsminderung wurde bei den Parametern TR (Abb. 4.94), Nges (Abb. 4.95) und Pges (Abb. 4.96) untersucht. Die TR-Konzentration im Ablauf des Dekanters war in linearer Form von der Zulaufkonzentration abhängig und stieg mit dieser an. Der Wirkungsgrad der TR-Elimination bewegte sich zwischen 29 % (TR= 30 kg/t) und 49,1 % (TR= 60 kg/t). Bei TR-Konzentrationen unter 17,5 kg/t ist nach den vorliegenden Ergebnissen keine TR-Abtrennung mehr möglich. Die Nges-Konzentration im Ablauf des Dekanters war linear abhängig von der Zulaufkonzentration und stieg mit dieser an. Bei einer Nges-Konzentration von 3 kg/t lassen sich 11 % des Nges abtrennen und bei einer Nges-Konzentration von 6 kg/t 17 %. Die Pges-Konzentration im Ablauf war bei der Dekantierung von der Zulaufkonzentration weitestgehend unabhängig. Sie lag bei durchschnittlich 0,28 kg/t und repräsentierte offensichtlich den gelösten Anteil an Phosphat-Verbindungen. Der Wirkungsgrad der Pges-Abtrennung lag zwischen 49 % (Zulaufkonzentration= 0,4 kg/t) und 85 % (Zulaufkonzentration= 2 kg/t).

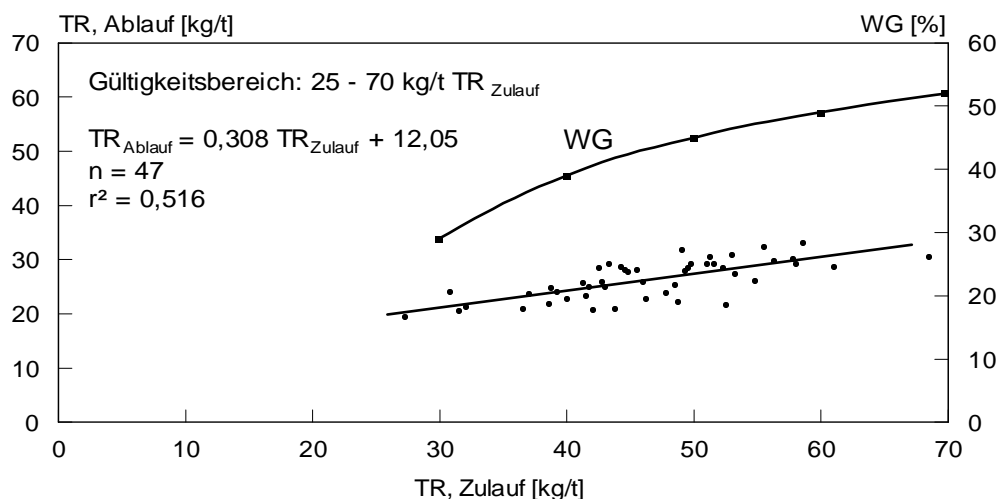


Abb. 4.94: Einfluss der TR-Konzentration im Zulauf auf den Wirkungsgrad der TR-Abtrennung bei der Dekantierung

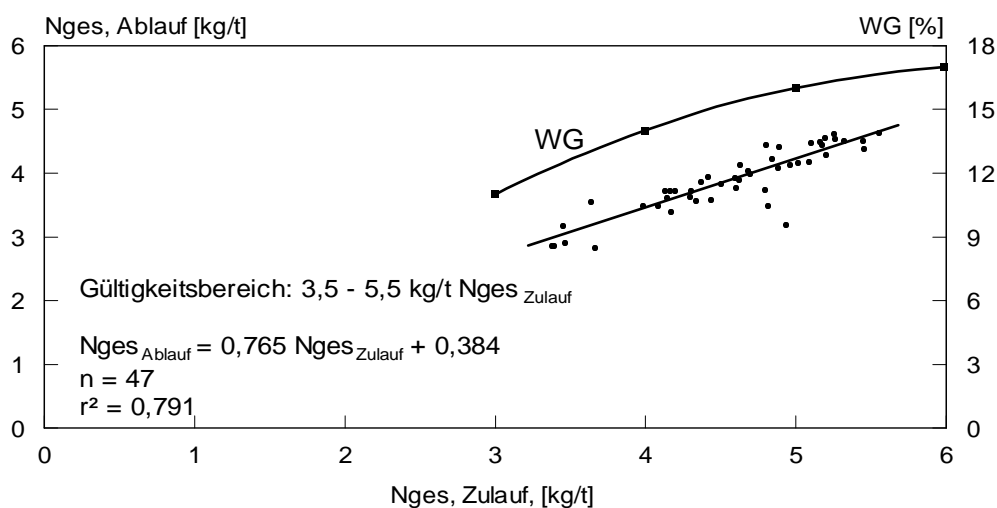


Abb. 4.95 : Einfluss der Nges-Konzentration im Zulauf auf den Wirkungsgrad der Nges-Abtrennung bei der Dekantierung

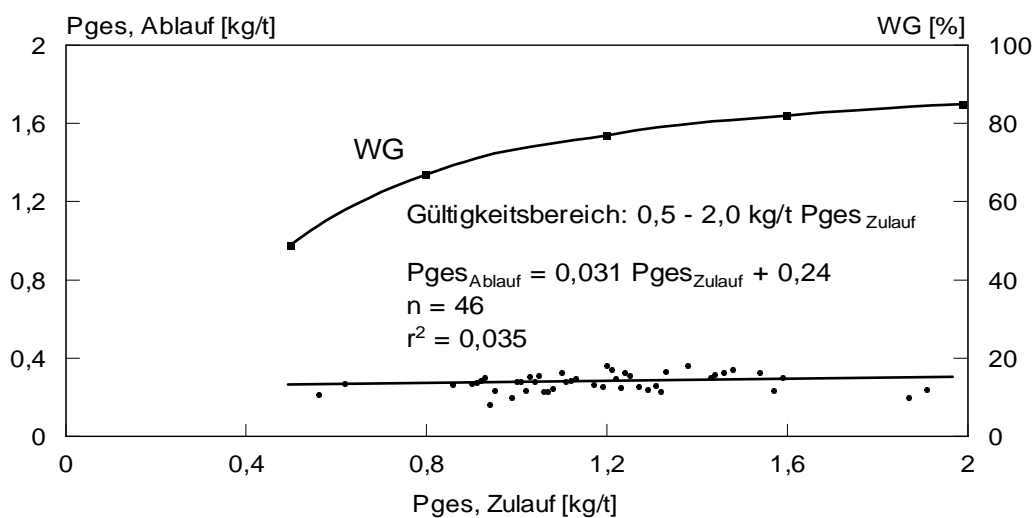


Abb. 4.96: Einfluss der Pges-Konzentration im Zulauf auf den Wirkungsgrad der Nges-Abtrennung bei der Dekantierung

Der Abscheidegrad ( $y_D$ ) des Dekanters errechnet sich aus der Gleichung

$$y_D = [(c_{zu} \times m_{zu}) - (c_{aus} \times m_{aus}) / (c_{zu} \times m_{zu})] \times 100,$$

wobei  $c$  die Konzentration des betrachteten Parameters und  $m$  die dazugehörige Masse darstellt. Unter Verwendung der Funktionen

- $y_M = 2,46 \times - 48,98$  (Massenabtrennung, Abb. 4.93),
- $y_{TR} = 0,308 \times + 12,05$  (TR-Abtrennung, Abb. 4.94)
- $y_{Nges} = 0,765 \times + 0,384$  (Nges-Abtrennung, Abb. 4.95) und
- $y_{Pges} = 0,031 \times + 0,24$  (Pges-Abtrennung, Abb. 4.96)

lassen sich theoretische Abscheidegrade für Fest- und Nährstoffe berechnen (Tab. 4.102). Die aerob-thermophil belüftete Gülle (Zulauf) wies eine durchschnittliche TR-Konzentration von 45,9 kg/t, eine Nges-Konzentration von 4,54 kg/t und eine Pges-Konzentration von 1,15 kg/t auf ( $n = 47$ ). Der unter diesen Bedingungen erzielte Abscheidegrad lag bei 6,4 % (Masse), 46,6 % (TR), 20,4 % (Nges) bzw. 77,2 % (Pges).

Tab. 4.102: Theoretische Abscheidegrade für Fest- und Nährstoffe bei der Dekantierung aerob-thermophil behandelter Mastschweinegülle

Konzentration [kg/t]						Masse [kg]		Abscheidegrad [%]		
TR		Nges		Pges						
Ein	Aus	Ein	Aus	Ein	Aus	Ein	Aus	TR	Nges	Pges
20	18,2	3,2	2,8	0,56	0,26	1000	978	11,0	14,4	54,6
40	24,4	4,4	3,8	1,00	0,27	1000	951	42,0	17,9	74,3
45,9	26,2	4,54	3,86	1,15	0,28	1000	936	46,6	20,4	77,2
60	30,5	5,2	4,4	1,46	0,29	1000	901	54,2	23,8	82,1
80	36,7	6,0	5,0	1,80	0,30	1000	852	60,9	29,0	85,8

#### 4.4.6 Feststoff-, Nährstoff- und Energiebilanz des Gesamtverfahrens

Unter Verwendung der Ergebnisse der Separation (Kap. 4.4.2), der Belüftungsversuche (Kap. 4.1, 4.4.3) und der Dekantierung (Kap. 4.4.5) können für beliebige Schweinerohgülle die Abscheidegrade der einzelnen Verfahrensstufen und die Gesamtabscheidegrade berechnet werden (Tab. 4.103). Die Daten der Tab. 4.103 geben die erzielbaren Abscheidegrade für hydraulische Verweilzeiten von 3 d bei Belüftungsraten von 10 bzw. 20  $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  an.

Der Gesamtabscheidegrad für die Masse lag bei einer Belüftungsrate von 10  $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  und einer hydraulischen Verweilzeit von 3 d bei 19,3 %. Hiervon wurden 38,1 % durch die Separation, 28,8 % durch die Belüftung und 33,1 % durch die Dekantierung abgetrennt. Bei einer Belüftungsrate von 20  $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  ist aufgrund einer stärkeren Verdampfung von Wasser von einer höheren Massenabscheidung (24,9 %) auszugehen. Unter diesen Bedingungen

würden 29,6 % dieses Anteils auf die Separation, 44,3 % auf die Belüftung und 25,7 % auf die Dekantierung entfallen.

Der Gesamtabscheidegrad in Hinblick auf den Trockenrückstand (TR) lag bei einer Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) und einer hydraulischen Verweilzeit von 3 d bei 66,5 %. Hiervon wurden 44,3 % durch die Separation, 10,9 % durch die Belüftung und 44,8 % durch die Dekantierung abgetrennt. Bei einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) würden 42,8 % durch die Separation, 16,4 % durch die Belüftung und 40,7 % durch die Dekantierung eliminiert werden.

Die Stickstoffelimination erfolgte zu einem wesentlichen Anteil während der Belüftung. Bei einer Belüftungsrate von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) wurde bei einer hydraulischen Verweilzeit von 3 d ein Abscheidegrad von 47,1 % erzielt, wobei 18,3 % dieses Anteils bei der Separation, 51,6 % bei der Belüftung und 30,1 % bei der Dekantierung eliminiert wurden. Bei der Belüftung mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) wurden 63,6 % des Nges abgetrennt. 13,6 % hiervon entfielen auf die Separation, 73,3 % auf die Belüftung und 13,1 % auf die Dekantierung.

Hinsichtlich des Gesamtphosphates wurde ein Abscheidegrad von 82,6 – 83,8 % erzielt, 21,5 – 21,6 % dieses Anteils wurden bei der Separation und 78,4 – 78,5 % bei der Dekantierung abgetrennt.

Tab. 4.103: TR- und Nährstoff-Abscheidegrade der einzelnen Verfahrensstufen und des Gesamtverfahrens bei Belüftungsraten von 10 und 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) und einer hydraulischen Verweilzeit von 3 Tagen

	Parameter	Einheit	BLR: 10 m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> · h)		BLR: 20 m <sup>3</sup> /(m <sup>3</sup> · h)	
				AG [%]		AG [%]
Rohgülle	Masse	[kg]	1000	-	1000	-
	TR	[kg/t]	63,2	-	63,2	-
	Nges	[kg/t]	5,90	-	5,90	-
	Pges	[kg/t]	1,30	-	1,30	-
Separierte Gülle	Masse	[kg]	926,4	7,4	926,4	7,4
	TR	[kg/t]	48,1	29,5	48,1	29,5
	Nges	[kg/t]	5,82	8,6	5,82	8,6
	Pges	[kg/t]	1,15	18,2	1,15	18,2
Belüftete Gülle	Masse	[kg]	870,8	6,0	815,0	12,0
	TR	[kg/t]	45,9	10,3	45,9	10,3
	Nges	[kg/t]	4,54	26,7	3,24	51,0
	Pges	[kg/t]	1,15	0	1,15	0
Dekantierte Gülle	Masse	[kg]	806,9	7,3	751,1	7,8
	TR	[kg/t]	26,2	47,1	26,2	47,4
	Nges	[kg/t]	3,86	21,2	2,86	18,6
	Pges	[kg/t]	0,28	77,4	0,28	77,6
Gesamt-Abscheidegrad	Masse	[kg]	193,1	19,3	248,9	24,9
	TR	[kg]	42,06	66,5	43,52	68,9
	Nges	[kg]	2,79	47,1	3,75	63,6
	Pges	[kg]	1,07	82,6	1,09	83,8

AG: Abscheidegrad



Der über die gesamte Projektlaufzeit von 2 Jahren gemittelte Energieverbrauch lag bei 1045,6 kWh/d. Bezogen auf die behandelte Güllemenge betrug der spezifische Energieverbrauch im Mittel 31,7 – 32,5 kWh/m<sup>3</sup> Rohgülle. Je nach täglichem Austauschvolumen variierte er zwischen 23,4 (Austauschvolumen: 50 m<sup>3</sup>/d), 31,8 (Austauschvolumen: 33 m<sup>3</sup>/d) und 40,7 kWh/m<sup>3</sup> (Austauschvolumen: 25 m<sup>3</sup>/d). Diese auf Belüftungsraten von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) beruhenden Werte würden bei Belüftungsraten von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) nochmals auf Werte von 33 – 57,4 kWh/m<sup>3</sup> ansteigen. Hauptenergieverbraucher sind das Gebläse und der Entschäumer (Tab. 4.104). Sie verursachen durchschnittlich 74,1 % des gesamten Energieverbrauchs (Belüftungsrate: 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)). Die Umwälzung durch die Reaktorumlaufpumpe bedingt nur 5,5 %, die Abluftwäsche weniger als 5 % und die gesamte mechanische Feststoffabtrennung (Separation und Dekantierung) weniger als 10 % des gesamten Energieverbrauchs. Die Berechnung der Leistung erfolgte nach der Formel

$$P \text{ [kWh/d]} = (U \text{ [V]} \cdot I \text{ [A]} \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{3} \times \text{Laufzeit [h/d]}) / 1000$$

mit einem  $\cos \varphi$  von 0,836 und einem U von 400 V.

Tab. 4.104: Energieverbrauch des Gesamtverfahrens sowie einzelner Aggregate

Benennung	Laufzeit [h/d]	Strom- stärke [A]	Leistung [kWh/d]	Leistung [%]
Separatorpumpe	3,5	3,3	6,7	0,7
Zwischenbehälterpumpe	3,5	3,3	6,7	0,7
Reaktorpumpe	2	4,0	4,6	0,5
Dekanterpumpe	4	3,4	7,9	0,8
Sammelbehälterpumpe	4	3,6	8,4	0,9
Reaktorumlaufpumpe	24	3,9	54,3	5,5
Wäscherumlaufpumpe	24	1,5	20,9	2,1
Wäscherumlaufpumpe	24	1,4	19,5	2,0
Rührwerk Behälter 2	2	9,8	11,4	1,2
Rührwerk Behälter 3	2	11,3	13,1	1,3
Rührwerk Behälter 5	2	10,5	12,2	1,2
Gebläse	24	32,5	452,4	46,1
Gebläse (Absaugung B 5)	24	0,9	12,5	1,3
Entschäumer	24	19,7	274,2	28,0
Separator	3,5	4,3	8,7	0,9
Dekanter	4	22,5	52,2	5,3
Feststoffschnecke 1	4	1,9	4,4	0,4
Feststoffschnecke 2	4	4,7	10,9	1,1
Summe			981	100

## 5 Diskussion

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die aerob-thermophile Belüftung ein geeignetes Verfahren zur Entseuchung von Gülle, zum Abbau geruchsrelevanter organischer Säuren sowie zur Stickstoffabtrennung darstellt. In Kombination mit mechanischen Trennverfahren (Separation, Dekantierung) kann darüber hinaus eine weitgehende Phosphatabtrennung erzielt werden. Während die Phosphorabtrennung mit einem Abscheidegrad von bis zu 86 % als technisch ausgereift und hinsichtlich der Zielsetzung des Verfahrens als völlig ausreichend anzusehen ist, trifft dies für die N-Elimination nur mit Einschränkungen zu.

### 5.1 Stickstoffumsatz

Nach den eigenen Untersuchungen liegt Stickstoff in separierter Schweinegülle zu etwa 75 – 85 % als Ammonium und zu 15 – 25 % organisch gebunden vor (Kap. 3, Tab. 3.1). Entsprechende Ergebnisse lieferten auch die Untersuchungen der Rohgülle, die zur Demonstrationsanlage geliefert wurde (Kap. 4.4.1, Tab. 4.94). Untersuchungen der LUFA Oldenburg [66] ergaben vergleichbare Resultate. Nitrit und Nitrat sind in Schweinegülle im Regelfall nur in vernachlässigbaren Konzentrationen nachweisbar.

Der organisch gebundene Stickstoff lässt sich bei der Separation in nennenswertem Umfang erst bei sehr hohen TR-Konzentrationen abtrennen (Kap. 4.4.2, Tab. 4.95). Bei durchschnittlich zusammengesetzter Schweinegülle ( $TR = 60 \text{ kg/m}^3$ ) lassen sich nach den eigenen Untersuchungen etwa 7,8 % des Gesamtstickstoffs bzw. 39 % des organisch gebundenen Stickstoffs abtrennen. Oechsner et al. gaben bei ihren Versuchen zur Separation von Schweinegülle Nges-Abscheidegrade von 5,1 bis 17,9 % an, wobei höhere Abscheidegrade nur bei höherem Wassergehalt in den abgetrennten Feststoffen erreicht wurden [67]. Bei vergleichbaren Wassergehalten lagen die Nges-Abscheidegrade bei lediglich 5,1 – 6,9 % und damit in einer mit den eigenen Versuchen vergleichbaren Größenordnung. Feststoffe mit hohem Wassergehalt ( $> 75 \%$ ) und geringem Strukturstoffanteil sind jedoch weder kompostierbar noch lagerfähig. Daher ist es wenig zweckmäßig, die N-Abtrennung durch die Separation auf diesem Wege zu erhöhen, zumal aus Sicht des Umweltschutzes eine nachträgliche Desorption von Ammoniak aus den Feststoffen zu befürchten ist.

Der Einsatz von Flockungsmitteln und Flockungshilfsmitteln würde nach Untersuchungen von Hügler [68] in Kombination mit einer vorgeschalteten Dekantierung und einer nachgeschalteten Flotation (Kieler Verfahren) zu einer deutlichen Verbesserung der mechanischen N-Abscheidung führen. Hügler gibt einen N-Abscheidegrad von 53 % an. Zwar ist es unbestreitbar, dass durch den Einsatz von Flockungs- und Flockungshilfsmitteln der N-Abscheidegrad erhöht werden kann, aber es wird ein nicht lagerfähiger, nicht kompostierfähiger und damit kaum verwertbarer Feststoff erzeugt. Soll dieser Feststoff – wie vom Autor vorgeschlagen – kompostiert werden, müssen Strukturstoffe in erheblichen Umfang beigemischt werden und Maßnahmen zur Minderung der Ammoniakemissionen bei der Kompostierung getroffen werden. Es ist zu befürchten, dass ein erheblicher Teil des abgetrennten Stickstoffs (auch adsorptiv gebundenes Ammonium) bei der Selbsterhitzung der Feststoffe wieder desorbiert wird. Der mit dem Verfahren abgetrennte Stickstoff wird nicht als Wertstoff zurückgewonnen (z. B. als Flüssigdünger) sondern in einem Reststoff angereichert. Ziel eines umweltverträglichen Güllebehandlungsverfahrens sollte jedoch

zuerst die Rückgewinnung und Nutzung von Wertstoffen sein. Problemverschärfend in Hinblick auf eine landwirtschaftliche Verwertung von Verfahrensprodukten wirkt sich zudem der Einsatz von Flockungs- und Flockungshilfsmitteln, insbesondere bei den nach Hügler erforderlichen Aufwandsmengen von  $0,1 - 1 \text{ kg Fe}^{3+}/\text{m}^3$  Gülle und  $0,01 - 0,1 \text{ kg Flockungshilfsmittel}/\text{m}^3$  Gülle aus. Hier besteht eine große Skepsis seitens der Landwirtschaft, „chemisch“ behandelte Gülle auf die Felder auszubringen. Aus fachlicher Sicht wäre die Schwermetall- und Salzfracht der Flockungsmittel und die biologische Abbaubarkeit der Flockungshilfsmittel zu überprüfen. Bei den eisen- und aluminiumhaltigen Flockungsmitteln, die oft als Nebenprodukte großtechnischer Prozesse anfallen [91, 92], müssen die Schwermetallkonzentrationen (Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Zink) und die Gehalte an organischen Halogenverbindungen gemäß Klärschlammverordnung [93] geprüft werden, um eine landwirtschaftliche Verwertung zu ermöglichen. Die Eisen- und Aluminiumfracht ist in diesem Zusammenhang weniger bedeutsam, zumal die Böden naturbedingt höhere Konzentrationen an diesen Metallen aufweisen und in der Klärschlammverordnung diesbezüglich keine Grenzwerte vorgesehen sind. Bei langfristigen Anwendungen von Eisenverbindungen als Flockungsmittel, bzw. zur Phosphatfällung auf Grünlandflächen ist die Wirkung auf den pH-Wert des Bodens zu prüfen [91]. Polyelektrolyte werden seit langem in der Klärschlammstabilisierung eingesetzt. Insbesondere kationische Produkte haben mit 90 % einen hohen Marktanteil [94]. Die am häufigsten eingesetzten Flockungshilfsmittel sind Polymere oder Copolymere auf Basis von Acrylamiden [94]. Diese werden je nach Ionenstärke und Ladungscharakter in Wassergefährdungsklassen (WGK) eingeteilt. Kationische Polyacrylamide mit einer Ionenstärke  $> 15 \%$  werden in die Wassergefährdungsklasse 3 eingeordnet, andere anionische oder nichtionische in die WGK 2. Der bestimmungsgemäße und fachgerechte Einsatz dieser Stoffe in der Abwasserbehandlung wird durch diese Einordnung jedoch bislang nicht eingeschränkt [95]. Problematisch aus Sicht des Bodenschutzes ist auch der Anteil von nicht kennzeichnungspflichtigen Begleitstoffen in den Handelsprodukten. Beim biochemischen Abbau bestimmter Stoffe wie z.B. Alkylphenolethoxylaten, die in Polyacrylamidemulsionen auftreten können, entstehen Nonylphenole, die in Verdacht stehen, das menschliche Hormonsystem zu beeinflussen, also über eine endokrine Wirkung zu verfügen [95]. Polyacrylamide sowie diverse Phenole werden als problematische Stoffgruppen angesehen, die in Hinblick auf ihr Gefährdungspotenzial für das Grundwasser noch zu untersuchen und zu bewerten sind [96]. Vor diesem Hintergrund wird verständlich, dass die Landwirtschaft der Verwertung chemisch behandelter Schlämme oder Gülle kritisch gegenübersteht.

Die aerob-thermophile Belüftung von Gülle erlaubt eine Strippung von Ammoniak, das sich durch eine schwefelsaure Wäsche aus dem Abgas quantitativ und in konzentrierter Form zurückgewinnen lässt. Das Produkt ist als Flüssigdünger verwertbar und trägt auf diese Weise zur Einsparung mineralischer Düngemittel bei, was einer tatsächlichen Verringerung der Umweltbelastung durch Stickstoff entspricht. Durch die effektive Rauchgasreinigung von Großfeuerungsanlagen (Entschwefelung) ist der Schwefelbedarf in der Landwirtschaft in den letzten Jahren wieder gestiegen und erhöht zusätzlich die Akzeptanz und den Wert dieses Flüssigdüngers.

Zur effektiven Strippung von Ammoniak sind die Parameter pH-Wert, Temperatur und Luft/Wasserverhältnis maßgebend. Die Erhöhung des pH-Wertes wirkt sich generell positiv auf die Ammoniakstrippung aus, weil entsprechend des  $\text{NH}_3/\text{NH}_4$ -Dissoziationsgleich-

gewichtet der Anteil des strippfähigen Ammoniaks erhöht wird und die bei der Strippung freiwerdenden Protonen gebunden werden können, ohne dass es zu einer pH-Wertabsenkung kommt [69 – 88]. Versuche von Srinath und Loehr [75] mit Hühnergülle ergaben, dass die Ammoniakstrippung bei pH-Werten von 10,5 optimal verläuft. Bei pH 9,6 lägen 60 % des Ammoniums als Ammoniak vor ( $T = 20\text{ °C}$ ), bei pH 10,6 94 % und bei pH 11,6 99 %. Die Autoren weisen nach, dass zur Einstellung eines pH-Wertes von 10,6 nur etwa 1 % der Alkalimenge notwendig ist, die zur Einstellung eines pH-Wertes von 11,6 erforderlich wäre. Bei der aerob-thermophilen Belüftung von Schweinegülle mit Belüftungsraten von  $5 - 20\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  wurden innerhalb von 100 h Belüftungszeit pH-Werte von 9,5 – 9,7 erreicht, wobei tendenziell höhere pH-Werte bei höheren Belüftungsraten erzielt wurden (Kap. 4.1.1, Tab. 4.4). Bei geringeren Belüftungsraten ( $<1\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ ) wurden infolge geringerer  $\text{CO}_2$ -Strippung auch nur pH-Werte von maximal 8,4 gemessen [34].

pH-Werte von 9,5 – 9,7 sind für eine quantitative Ammoniakstrippung nicht ausreichend, können jedoch ohne die Dosierung von Alkalien nicht erhöht werden. Der Natriumhydroxidbedarf (Festsubstanz) zur Anhebung des pH-Wertes in Schweinegülle üblicher Zusammensetzung auf Werte über 10 liegt bei etwa  $8\text{ kg/m}^3$  Rohgülle. Selbst in aerob-thermophil behandelter Gülle liegt er noch bei etwa  $2\text{ kg/m}^3$ . Der große Alkalienbedarf ist im wesentlichen auf den Kohlensäure-Puffer zurückzuführen, der überwunden werden muss. Mit der Belüftung sinkt der Alkalienbedarf, weil das Kohlendioxid gestrippt wird und damit die Pufferkapazität abnimmt (Kap. 4.1.2). Der Einsatz von Alkalien zur pH-Wertanhebung in Gülle ist in mehrfacher Hinsicht kritisch zu beurteilen. Ein Einsatz von preiswertem Kalk scheitert an der Ausfällung von Carbonaten und Phosphaten sowie an seiner korrosiven und abrasiven Wirkung auf Metallteile (z. B. Dekanterschnecke). Kalk müsste zur Erzielung einer vollständigen Wirkung außerdem als Kalkmilch separat angemischt werden, was zu einer Massenmehrung und zu erhöhtem technischen Aufwand führt. Die Verwendung von Natronlauge ist kostspielig und führt zur Aufsalzung der fermentierten Gülle, deren landwirtschaftliche Verwertung damit erschwert werden würde (Boden- und Grundwasserbelastung). Aus den beschriebenen Gründen wurde auf eine pH-Wertanhebung mit Alkalien verzichtet.

Die Erhöhung der Temperatur führt infolge der Verschiebung des  $\text{NH}_3/\text{NH}_4$ -Dissoziationsgleichgewichtes ebenfalls zu einer Erhöhung der Konzentration an strippbarem Ammoniak und damit zu einer Verbesserung der Ammoniakstrippung [71 – 76, 80, 84, 87 – 90]. Für eine quantitative Ammoniakstrippung mit Luft werden Temperaturen von  $>45\text{ °C}$  [87],  $80\text{ °C}$  [88] bzw.  $70 - 90\text{ °C}$  [89] als optimal beschrieben. Mit der aerob-thermophilen Belüftung von Schweinegülle lassen sich Temperaturen von bis zu  $73\text{ °C}$  erzielen (Kap. 4.1.3). Je nach Belüftungsrate sind hierfür jedoch entsprechend hohe  $\text{BSB}_5$ -Konzentrationen erforderlich (Kap. 4.1.3, Abb. 4.20). Um die für die Ammoniakstrippung mit Luft günstigen Temperaturen erreichen zu können, muss demzufolge eine Verdünnung der Gülle durch Tränkewasser-, Regenwasser- oder Fremdwassereintrag unbedingt vermieden werden. Ferner ist eine Güllelage bei Temperaturen oberhalb von  $15\text{ °C}$  wegen einsetzender Methanisierungsvorgänge, die zu einem  $\text{BSB}_5$ -Abbau führen, möglichst zu vermeiden. Besonders kritisch ist in diesem Zusammenhang die Güllelage im Stall über die Sommermonate zu beurteilen.

Neben pH-Wert und Temperatur ist das Luft/Flüssigkeitsverhältnis für die Ammoniakstrippung von erheblicher Bedeutung. Da die Geschwindigkeit der Ammoniakstrippung auch von der Austauschfläche und dem Konzentrationsgefälle zwischen Gas- und Flüssigphase abhängt, führt die Erhöhung des Luftvolumenstromes bzw. des Luft/Flüssigkeitsverhältnisses zu einer Beschleunigung der Ammoniakstrippung [69 – 72, 75, 77, 83, 85, 87, 90]. Die in der Literatur angegebenen Daten für optimale Luft/Flüssigkeitsverhältnisse sind nicht vergleichbar, da sie bei unterschiedlichen pH-Werten, Temperaturen und mit unterschiedlichen Substraten untersucht wurden. Generell steigt der Luftbedarf für eine bestimmte Eliminationsleistung mit abnehmenden pH-Werten an, während er mit zunehmenden Temperaturen sinkt. In der Literatur wurden Luft/Flüssigkeitsverhältnisse von bis zu 5920 untersucht. Unter Umgebungstemperaturen bei pH-Werten über 9 erzielten Slechta und Culp [70] Eliminationsgrade von 80 – 98 % bei Luft/Flüssigkeitsverhältnissen von 1480 – 5920. Um von einem Wirkungsgrad von 95 % auf 98% zu kommen, musste das Luft/Flüssigkeitsverhältnis von 2960 auf 5920 gesteigert werden, während ein 80 % -iger Wirkungsgrad bereits bei einem Verhältnis von 1480 erzielt wurde. Damieki und Kühn [77] fanden bei ihren Untersuchungen prinzipiell vergleichbare Zusammenhänge. Bei Temperaturen von 10 – 17 °C und einem pH-Wert von 12 wurden bei einem Luft/Flüssigkeitsverhältnis von 1000 32 % des Ammoniaks eliminiert, bei 2000 52 % und bei 2500 73 %.

Die batch-Versuche zur aerob-thermophilen Belüftung von Schweinegülle wurden mit Luft/Flüssigkeitsverhältnissen von 500 bis 2000 durchgeführt. Die maximalen  $\text{NH}_4\text{N}$ -Eliminationsgrade lagen bei einem Luft/Flüssigkeitsverhältnis von 500 bei pH-Werten um 9,5 und Gülletemperaturen von 67,7- 71,3 °C bei 57 % (Kap. 4.1.8, Abb. 4.60, V 130, V 149). Im Mittel lag der Eliminationsgrad bei 35 %. Bei einem Luft/Flüssigkeitsverhältnis von 1000, einem pH-Wert von 9,3 und einer Temperatur von 72,8 °C wurden maximale  $\text{NH}_4\text{N}$ -Eliminationsgrade von 89 % erreicht (Kap. 4.1.8, Abb. 4.61, V 145), im Mittel betrugen sie 72 %. Luft/Flüssigkeitsverhältnisse von 2000 erbrachten maximale Eliminationsgrade von 83 % (pH: 9,3, T: 67,3 – 71 °C), im Mittel lagen sie bei 78 % (Kap. 4.1.8, Abb. 4.62, V 116, V 117, V 119, V 125). Die  $\text{NH}_4\text{N}$ -Elimination beruht bei der aerob-thermophilen Belüftung jedoch nicht nur auf einer Ammoniakstrippung sondern auch auf einer mikrobiellen Stickstoff-assimilation. Sie führt dazu, dass die Gesamtstickstoff-Elimination geringer ausfällt als die Ammonium-Elimination (Kap. 4.1.9, 4.1.10). Bedingt durch die unvermeidbare N-Assimilation liegt die maximale Nges-Elimination bei einem Luft/Flüssigkeitsverhältnis von 500 nach den vorliegenden Ergebnissen bei ca. 38 % (pH: 9,5, T: 67 – 71 °C). Bei Luft/Flüssigkeitsverhältnissen von 1000 – 2000 bei realistischen Belüftungszeiten von bis zu 100 h wurden maximal 58 bis 63 % des Gesamtstickstoffs eliminiert. Eine maximale Nges-Elimination von etwa 60 - 65 % ergibt sich auch aus folgenden Überlegungen: In separierter Rohgülle liegen im Mittel ca 19 % des Gesamtstickstoffs als organisch gebundener Stickstoff vor (Kap. 3, Tab. 3.1). Bei der aerob-thermophilen Belüftung werden innerhalb von 100 h Belüftungszeit in Abhängigkeit von der bei der Belüftung erzielten Maximaltemperatur 15,5 – 21,8 % des eliminierten  $\text{NH}_4\text{N}$  ( $\text{BLR} = 5 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ ), 14 – 29,2 % ( $\text{BLR} = 10 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ ) bzw. 8,2 – 34,1 % ( $\text{BLR} = 20 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ ) zu organisch gebundenem Stickstoff umgesetzt (Kap. 4.1.10, Tab. 4.47 – 4.49). Tendenziell findet eine relativ starke N-Assimilation bei kürzeren Versuchszeiten und geringeren Temperaturen statt. Der Umfang der N-Assimilation sinkt mit zunehmender Belüftungszeit. Vergleichbare Ergebnisse stellte Ginnivan [47] bei seinen Versuchen zur thermophilen Belüftung von Schweinegülle mit hydraulischen Verweilzeiten von 1 – 10 d fest.

Die höchsten Proteinkonzentrationen fand Ginnivan bei hydraulischen Verweilzeiten von 2 – 3 d, während längere Verweilzeiten zur Abnahme der Konzentration organischen Stickstoffs führten. Ghaly und Kok [55] stellten bei der Belüftung unterschiedlich verdünnter Schweinegülle unter mesophilen Bedingungen ebenfalls fest, dass die N-Assimilation bei kurzen Belüftungszeiten relativ hoch ist und mit der Dauer der Belüftung abnimmt.

Bei den quasikontinuierlichen Versuchen (Kap. 4.2) wurden im Vergleich zu den batch-Versuchen (Kap. 4.1.8 – 4.1.10) geringere Eliminationsgrade für Ammonium und Gesamtstickstoff gefunden. Bei Versuch 112 (Kap. 4.2.4, Tab. 4.72) wurden bei einer hydraulischen Verweilzeit von 4 d bei Maximaltemperaturen von etwa 65 °C und pH-Werten von 9,6 im Mittel 66,8 % des  $\text{NH}_4\text{N}$  und 44,5 % des Gesamtstickstoffs eliminiert ( $\text{BLR} = 20 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ ). Bei vergleichbaren Versuchsbedingungen wurden bei den batch-Versuchen Eliminationsgrade von 70 – 80 % ( $\text{NH}_4\text{N}$ ) bzw. 50 – 60 % (Nges) erzielt. Als wesentliche Ursache für diese Ergebnisse sind die unterschiedlichen Temperaturhaltezeiten anzusehen. Im batch-Versuch wurden bei  $\text{BSB}_5$ -Konzentrationen von 40 - 41 g/kg Maximaltemperaturen von 67,3 °C erzielt und Temperaturen über 50 °C über 41 h aufrechterhalten (Kap. 4.1.3, Tab. 4.1.2). Bei den quasikontinuierlichen Versuchen können bei vergleichbaren  $\text{BSB}_5$ -Konzentrationen (V 112) auch entsprechende Maximaltemperaturen erzielt werden. Bedingt durch den Betriebszyklus sind die Temperaturhaltezeiten jedoch deutlich verkürzt (Kap. 4.2.1, Abb. 4.71). Ausgehend von einer Temperatur von durchschnittlich 38 °C nach Wiederauffüllung und einem Temperaturanstieg von 1,8 °C/h würden Temperaturen von 50 °C nach ca. 7 h Belüftungszeit erreicht und könnten für maximal 14 h gehalten werden, bevor die Wiederauffüllung erfolgt (Abb. 4.71). Mit sinkenden  $\text{BSB}_5$ -Konzentrationen in der separierten Gülle würden die Maximaltemperaturen ebenso fallen wie durch die Wiederauffüllung mit Frischgülle. Mit sinkender Temperatur steigt jedoch die Strippluftmenge, die zur Erzielung eines bestimmten Wirkungsgrades oder einer festgelegten Ablaufkonzentration erforderlich ist.

Bedingt durch die kürzeren Temperaturhaltezeiten im quasikontinuierlichen Betrieb sowie  $\text{BSB}_5$ -Konzentrationen, die die Temperaturentwicklung oftmals limitierten, lagen bei Belüftungsraten von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  die Eliminationsgrade für Ammonium je nach hydraulischer Verweilzeit zwischen 18,6 und 34,8 % und für Gesamtstickstoff bei 12,3 bis 22,2 %. Bei Belüftungsraten von  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  lagen die Eliminationsgrade in Abhängigkeit der hydraulischen Verweilzeit zwischen 55 und 68 % ( $\text{NH}_4\text{N}$ ) bzw. 35 und 53 % (Nges) (Kap. 4.3.6). Die Versuche in der Demonstrationsanlage (Kap. 4.4) mit Belüftungsraten von  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  ergaben je nach hydraulischer Verweilzeit Eliminationsgrade von 22,1 bis 47,0 % ( $\text{NH}_4\text{N}$ ) und 9,7 bis 29,6 % (Nges). Damit zeigt sich, dass die Versuchsergebnisse der halbtechnischen Versuchsanlage auf die Demonstrationsanlage übertragbar sind.

Aus der belüfteten Gülle kann über eine Dekantierung sehr effektiv Phosphat, in gewissem Umfang auch organisch gebundener Stickstoff abgetrennt werden (Kap. 4.4.5). Bei Nges-Konzentrationen von 3 – 6 kg/ $\text{m}^3$  im Zulauf des Dekanters können 11 – 17 % des Gesamtstickstoffs, bzw. 30 – 50 % des organisch gebundenen Stickstoffs mit den Feststoffen abgetrennt werden.

Aus Schweinegülle durchschnittlicher Zusammensetzung können mit dem Gesamtverfahren bei Belüftungsraten von 10 bis  $20 \text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  47,1 bis 63,6 % des Gesamtstickstoffs eliminiert

werden (Kap. 4.4.6, Tab. 4.103). Zur Steigerung der N-Elimination bieten sich grundsätzlich die pH-Wertanhebung, eine Temperaturerhöhung, die Erhöhung des Luft/Flüssigkeitsverhältnisses sowie eine Änderung der Betriebsweise des Bioreaktors an. Die pH-Wertanhebung ist aus den bereits beschriebenen Gründen wenig praktikabel. Auf mikrobiellem Wege sind Temperaturen über 73 °C nicht zu erreichen, so dass zur Temperaturerhöhung thermische Energie zugeführt werden müsste. Die Vorwärmung des Zutrages über eine Wärmenutzung des Austrages (über Wärmetauscher) könnte zu einer Vergleichmäßigung der Gülletemperatur auf höherem Niveau führen. Denkbar wäre auch eine verfahrenstechnische Trennung der Belüftung von der Ammoniakstrippung, die sinnvollerweise nachzuschalten wäre. Die Güllebelüftung könnte dann mit deutlich reduzierten Belüftungsraten erfolgen, um möglichst hohe Gülletemperaturen zu erzielen. In einem zweiten Verfahrensschritt könnte die Ammoniakstrippung in einer Strippanlage und die Ammoniakabsorption in einem Füllkörperwäscher mit geschlossenem Luftkreislauf erfolgen. Ein einfacher Weg zur Erhöhung der N-Elimination stellt in jedem Fall die Änderung des Betriebszyklus in einen reinen batch-Betrieb dar. Durch die Verlängerung der Temperaturhaltezeiten im batch-Betrieb lassen sich innerhalb von 100 h Belüftungszeit über 60 % des Gesamtstickstoffs eliminieren. Aufgrund des Gehaltes an organischem Stickstoff in der Rohgülle in einer Größenordnung von 20 % sowie einer mikrobiellen Stickstoffassimilation im Zuge der Belüftung liegt die maximale Nges-Elimination bei etwa 60 - 70 %.

## 5.2 Kohlenstoffumsatz

Bei der aerob-thermophilen Belüftung wird der mikrobielle Kohlenstoffabbau zur Selbsterhitzung genutzt. Separierte Schweinegülle ist durch ein mittleres BSB<sub>5</sub>/CSB-Verhältnis von 0,35 gekennzeichnet, wobei Schwankungen zwischen 0,21 bis 0,67 auftreten können (Kap. 3, Tab. 3.1). Die somit nur als eingeschränkt abbaubar einzustufende Schweinegülle weist CSB-Konzentrationen von 17 bis 117 kg/m<sup>3</sup> und BSB<sub>5</sub>-Konzentrationen von 8,5 – 48,6 kg/m<sup>3</sup> auf, wobei ca. 53 % des BSB<sub>5</sub> von organischen Säuren, die leicht abbaubar sind, verursacht werden. Bei den organischen Säuren überwiegt im Regelfall Essigsäure, die im Mittel 56 % des BSB<sub>5</sub> ausmacht, gefolgt von Propionsäure mit einem Anteil von 25,1 %. Iso-Buttersäure (5,6 %), Buttersäure (7,4 %), Iso-Valeriansäure (4,9 %) und Valeriansäure (0,9 %) machen jeweils nur einen relativ kleinen Anteil des BSB<sub>5</sub> aus.

Die Reduktion des Trockenrückstandes (TR) fiel bei der Belüftung insgesamt gering aus und war sowohl von der Belüftungszeit, der Temperatur und der Belüftungsrate abhängig (Kap. 4.1.4). Bei einer Belüftungsrate von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) betrug sie nach 80 – 100 h Belüftungszeit 9 – 14 %, bei 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) 16,9 – 21,4 % und bei 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) 20,3 – 27,8 %. Diese Ergebnisse übertreffen die von Evans et al. [50], der bei kontinuierlichen Versuchen Abbaugrade von lediglich 10 – 20 % bei Belüftungszeiten von 8 d bei Temperaturen von 25 – 45 °C erreichte. Sneath et al. fanden bei ihren Versuchen an einer Praxisanlage zur Belüftung von Schweinegülle TR-Abbaugrade von 10 – 15 % (Außentemperatur, Redoxpotenzial 100 – 200 mV). Ginnivan [47] erreichte bei Belüftungszeiten von 10 d und Temperaturen von 55 °C im kontinuierlichen Betrieb TR-Abbaugrade von 56 %, Evans et al. [50] fanden bei 50 °C und 8 d Belüftungszeit Abbaugrade von mehr als 30 %. Die eigenen batch-Versuche ergaben jedoch bei keinem Versuch TR-Abbaugrade von 30 oder gar 56 %. Dies mag darauf zurückzuführen sein, dass im batch-Versuch – im Gegensatz zum kontinuierlichen Versuchsbetrieb - sowohl eine mesophile als auch eine thermophile Versuchsphase durchlaufen wird.

Wahrscheinlicher ist jedoch, dass die von Ginnivan eingesetzte Gülle ein anderes BSB<sub>5</sub>/CSB-Verhältnis aufgewiesen hat und damit besser abbaubar war. Ferner muss berücksichtigt werden, dass die Versuche von Ginnivan mit einer Verweilzeit von 10 d durchgeführt wurden, während die eigenen Versuche nur über 100 h (4,2 d) betrieben wurden.

Der CSB-Abbau war von der Belüftungszeit, der Temperatur und der Belüftungsrate abhängig (Kap. 4.1.5). Bei einer Belüftungsrate von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) betrug er nach 100 h Belüftungszeit im Mittel 27,9 %, wobei die Schwankungsbreite zwischen 6,8 und 32,5 % lag. Belüftungsraten von 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) ergaben nach 100 h Abbaugrade von 14,6 – 52,9 %. Im Mittel wurde ein Abbaugrad von 34,5 % erzielt. Die Steigerung der Belüftungsrate von 10 auf 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) führte kaum noch zu einer Verbesserung des CSB-Abbaugrades. Nach den vorliegenden Ergebnissen liegt der maximale Abbaugrad innerhalb einer Belüftungszeit von 100 h bei etwa 42 %. Die Abbaugeschwindigkeit war stark temperaturabhängig und erreichte bei Temperaturen um 45 °C maximale Werte und fiel im thermophilen Bereich wieder ab. Evans et al. [45] fanden CSB-Abbaugrade von 38 – 43 %, als sie Schweinegülle im kontinuierlichen Betrieb bei 15 °C über 7 bzw. 14 d belüfteten. Einen Einfluss der Sauerstoffsättigung (< 1 bis 40 %) auf den CSB-Abbau konnten Sneath und Evans [48] bei Temperaturen von 15 °C nicht feststellen. Hissett et al. [49] fanden einen deutlichen Zusammenhang zwischen Respirationsrate und Gülletemperatur, wobei die maximale Respirationsrate bei 40 °C mit 335 mg O<sub>2</sub>/(g TR · d) lag. Ginnivan [47] und Evans et al. [50] fanden CSB-Abbaugrade von mehr als 50 % bei kontinuierlichen Versuchen bei 50 °C und Verweilzeiten von 8 – 10 d. Sneath et. al. [41] stellten CSB-Abbaugrade von 24 % - 33 % bei der Belüftung von Schweinegülle mit hydraulischen Verweilzeiten von 1 bis 4 d fest. Die in der Literatur dokumentierten CSB-Abbaugrade stimmen somit – abgesehen von den sehr hohen Abbaugraden bei 50 °C - weitgehend mit den Ergebnissen der eigenen Versuche überein. Die Versuche bei Belüftungsraten von 10 – 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) haben ferner gezeigt, dass ein erheblicher Anteil des abbaubaren CSB bereits innerhalb der ersten 48 h mineralisiert wurde (Kap. 4.1.5, Abb. 4.26, 4. 27).

Der BSB<sub>5</sub>-Abbau war von der Belüftungszeit, der Temperatur und von der Belüftungsrate abhängig (Kap. 4.1.6). Die nach 100 h erzielten Abbaugrade bewegten sich zwischen 80 (BLR= 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)) und 90 % (BLR= 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)). Insbesondere bei Belüftungsraten von 10 und 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) war ein erheblicher Anteil des BSB<sub>5</sub> bereits nach 48 h mineralisiert. Versuche von Evans [45] ergaben BSB<sub>5</sub>-Abbaugrade von 80 % bei Belüftungszeiten von 8 d und Temperaturen von 15 °C. Ginnivan fand einen 75 % igen BSB<sub>5</sub>-Abbau bei Verweilzeiten von weniger als 2 d (T= 55 °C, Sauerstoffsättigung 10 – 30 %). Verweilzeiten von 10 d ergaben Abbaugrade von 90 %. Die Ergebnisse der eigenen Versuche sowie die Literaturangaben bestätigen, dass ein vollständiger BSB<sub>5</sub>-Abbau auch bei langen Verweilzeiten nicht erreicht werden kann. Dieser Befund ist mit der endogenen Atmung der Mikroorganismen zu erklären (Grundatmung), die von der Substratatmung (Sauerstoffverbrauch durch Abbau von externen C-Quellen) zu unterscheiden ist.

Der Abbau von Fettsäuren wurde im Rahmen dieser Arbeit intensiver untersucht, da sie eine niedrige Geruchswahrnehmungsschwelle aufweisen und damit für den teilweise extrem unangenehmen Geruch der Schweinegülle mitverantwortlich sind. Ein Güllebehandlungsverfahren sollte in jedem Fall zu einer Beseitigung der Geruchsbelästigungen durch die



Güllewirtschaft beitragen. Generell war der Abbau der flüchtigen Fettsäuren von der Belüftungszeit, der Temperatur und in geringerem Umfang von der Belüftungsrate abhängig (Kap. 4.1.7). Bei den durchgeführten Versuchen fiel auf, dass die maximalen Abbauraten bei einer konstanten Belüftungsrate stärker schwankten als die Werte zwischen verschiedenen Belüftungsraten. Aus diesen Ergebnissen wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass hinsichtlich der maximalen Abbaurate weniger die Belüftungsrate (zwischen 5 und 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)) die wesentliche Einflussgröße darstellte, als vielmehr die TR-Konzentration von erheblicher Bedeutung war.

Bei Essigsäure ergaben die Auswertungen eine maximale Abbaurate von 6,1 %/h bei einer TR-Konzentration von 10 g/kg, bei der eine Nachversäuerung aus organischen Feststoffen praktisch auszuschließen ist. Mit steigenden TR-Konzentrationen nahm die maximale Abbaurate ab und wurde tendenziell auch erst nach längerer Belüftungszeit erreicht. Dementsprechend später wurden auch erst Abbaugrade von 90 % und mehr erreicht (Kap. 4.1.7, Tab. 4.24). Auf der Grundlage dieser Auswertungen ist – bedingt durch Hydrolyse- und Versäuerungsvorgänge – mit einer Säurenachlieferung aus dem Abbau von Feststoffen zu rechnen. Sie verringert scheinbar die maximale Abbaurate. Der Umfang und die Art der Säurenachlieferung ist abhängig von der TR-Konzentration und vom Stoffwechsel der an diesem Prozess beteiligten Organismen.

Propionsäure wurde bei einer TR-Konzentration von 10 g/kg mit einer maximalen Abbaurate von 2,8 %/h und damit wesentlich langsamer oxidiert als Essigsäure (Tab. 4.26). Der Zeitraum, der zur Erzielung eines Abbaugrades von mindestens 90 % erforderlich war, stieg mit der TR-Konzentration an. Die maximalen Abbauraten für Propionsäure stiegen auf Werte von bis zu 4,4 %/h. Entsprechende Werte wurden nach 30 – 50 h Belüftungszeit bei erhöhten TR-Konzentrationen gefunden. Unter diesen Bedingungen war jedoch schon ein erheblicher Teil der Essigsäure oxidiert worden.

Für Iso-Buttersäure wurden ähnliche Werte gefunden wie für Propionsäure. Ohne Feststoffeinfluss ist von einer maximalen Abbaurate von 2,5 %/h auszugehen (Tab. 4.28). Werte von bis zu 4,8 %/h wurden bei erhöhten TR-Konzentrationen und erhöhten Temperaturen erreicht.

Buttersäure ist nach den vorliegenden Ergebnissen das Substrat, bei dem mit 7,1 %/h die höchste maximale Abbaurate erzielt wurde. Der Buttersäure-Abbau setzte im Regelfall sofort ein, während der Abbau von Propionsäure und insbesondere Iso-Buttersäure mit steigenden TR-Konzentrationen erst zeitverzögert einsetzte (Tab. 4.30). Dementsprechend wurde ein Abbaugrad von 90 % und mehr nach spätestens 39 h erzielt, während bei Propionsäure und Iso-Buttersäure hierfür bis zu 60 h erforderlich waren.

Iso-Valeriansäure wurde nach den vorliegenden Ergebnissen mit 3,7 %/h (TR= 10 g/kg) deutlich schneller abgebaut als Propionsäure und Iso-Buttersäure (Tab. 4.32). Mit steigenden TR-Konzentrationen setzte der Netto-Abbau später ein, so dass ein 90 % -iger Abbau entsprechend später erzielt wurde. Eine maximale Abbaurate von 5,2 %/h wurde bei erhöhten TR-Konzentrationen und erhöhten Temperaturen nach etwa 40 h erzielt.

Auch bei Valeriansäure wurden ohne Feststoffeinfluss sehr hohe, maximale Abbauraten von 6,3 %/h gefunden (Tab. 4.34). Der Abbau setzte im Regelfall deutlich schneller ein als der Abbau von Iso-Valeriansäure und war entsprechend schneller abgeschlossen.

Für eine Geruchsminderung bei der Güllebehandlung ist der Abbau flüchtiger Fettsäuren von erheblicher Bedeutung. Flüchtige Säuren machen etwa 53 % des BSB<sub>5</sub> in separierter Schweinegülle aus. Arbeiten von Williams [39] haben gezeigt, dass der BSB<sub>5</sub> der zentrifugierten Probe (und damit organische Säuren) und die Geruchstoffbelastung einen deutlichen Zusammenhang aufweisen. Flüchtige Fettsäuren werden bei der Belüftung von Gülle bevorzugt oxidiert. Bedingt durch organische Feststoffe in der Gülle werden diese Säuren jedoch über die Versäuerung auch nachgeliefert. Der Umfang dieser Versäuerung ist von der Konzentration organischer Feststoffe abhängig. Mit steigenden Feststoffkonzentrationen steigt auch die erforderliche Belüftungszeit, um einen 90 % -igen Abbau von flüchtigen Säuren zu erreichen. In ungünstigen Fällen kann die erforderliche Belüftungszeit bis zu 70 h betragen (Iso-Valeriansäure, hohe TR-Konzentrationen).

### 5.3 Entseuchung

Die batch-Versuche haben bestätigt, dass eine Abtötung von human- und tierpathogenen Bakterien mit der aerob-thermophilen Belüftung möglich ist (Kap. 4.1.11). Während die Abnahme der Gesamtzellzahl um etwa eine Potenz eher gering war, wurden Salmonellen (sofern überhaupt nachweisbar), Enterobakterien sowie E. coli innerhalb von maximal 26 h – meistens noch unter mesophilen Bedingungen – vollständig inaktiviert. Zur Abtötung von Fäkalstreptococcen waren in der Mehrzahl der Versuche höhere Temperaturen und auch längere Einwirkzeiten erforderlich. Mikrobiologische Untersuchungen bei den kontinuierlichen Versuchen ergaben, dass bei Maximaltemperaturen von 50 – 56 °C Salmonellen, Enterobakterien und E. coli immer und vollständig abgetötet und Fäkalstreptococcen um 3 bis 5 Potenzen reduziert wurden (Kap. 4.3.7, Tab. 4.89). Selbst bei Maximaltemperaturen von 46,3 – 51,5 °C wurden Enterobakterien vollständig abgetötet und Fäkalstreptococcen um 2 – 3 Potenzen reduziert (Tab. 4.91). In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, dass die Temperatur-Einwirkzeiten - bedingt durch den Betriebszyklus - mit etwa 14 h vergleichsweise kurz waren. Ein Versuch, bei dem neben Ampullen (Entseuchung nur durch Hitzeeinwirkung) auch Keimträger eingesetzt wurden, ergab, dass neben der Temperatur auch andere Effekte für die Entseuchung relevant sind. Die Abtötung von Salmonellen auf Keimträgern, die Substratkontakt hatten, verlief schneller als die Abtötung in Ampullen (Tab. 4.92). Untersuchungen zur Abtötung von Viren zeigten, dass bei Temperaturen oberhalb von 50 °C eine rasche Inaktivierung von Aujeszky- und ECBO-Viren im Rahmen der Belüftung möglich ist (Tab. 4.93).

Die Ergebnisse zur Entseuchung von Schweinegülle im Rahmen der aerob-thermophilen Belüftung entsprechen weitgehend den Daten, die in der Literatur dokumentiert sind (Kap. 2.1.1). Die batch-Versuche haben jedoch noch einen weiteren Aspekt ergeben, der insbesondere die Inaktivierung von Fäkalstreptococcen betrifft. Steigende TR-Konzentrationen erschwerten die Inaktivierung dieser Organismen. Während bei TR-Konzentrationen von 39,6 g/kg (V 58, Tab. 4.50) eine vollständige Abtötung nach 40 h bei 51,5 °C und einem pH-Wert von 9,49 erreicht wurde, gelang dies bei TR-Konzentrationen von 64,2 g/kg bei vergleichbaren Bedingungen auch nach 66 h nicht mehr quantitativ (V 67, Tab. 4.51). Bei TR-Konzentrationen von 72,4 g/kg konnte selbst bei Maximaltemperaturen

von mehr als 68 °C (über 13 h) und Belüftungszeiten von 96 h keine quantitative Abtötung mehr erreicht werden (Tab. 4.52). Es ist zu vermuten, dass eine geringe Zahl von Fäkalstreptococcen in den porösen Zwischenräumen der organischen Feststoffe überlebt hat. Dort dürften jedoch dieselben Temperaturbedingungen wie in der Flüssigphase geherrscht haben. Insofern könnte in diesem Zusammenhang die Konzentration freien Ammoniaks für die entseuchende Wirkung wichtig sein. Feststoffe senken den pH-Wert (Kap. 4.1.1, Abb. 4.5) und können Ammoniak und Ammonium adsorptiv binden. Feststoffe unterliegen ferner einer Versäuerung (Kap. 4.1.7), die ebenfalls zu einer pH-Wertsenkung beiträgt. Bedingt durch den Sauerstoffmangel in diesen Zonen könnten organische Säuren akkumuliert werden. Diese Vorgänge beeinflussen das Ammonium/Ammoniakgleichgewicht in mehrfacher Hinsicht. Zum einen könnte die Konzentration der gelösten Fraktionen durch Adsorption sinken und zum anderen durch pH-Wertverschiebungen die Konzentration freien Ammoniaks sinken. Es ist daher vorstellbar, dass in den porösen Zwischenräumen der Feststoffe deutlich geringere Konzentrationen freien Ammoniaks auftreten als in der umgebenden Flüssigkeit. Während nach den vorliegenden Ergebnissen Enterobakterien, Salmonellen und *E. coli* aufgrund ihrer höheren Temperaturempfindlichkeit auch bei höheren TR-Konzentrationen sicher abgetötet werden, ist bei thermotoleranteren Fäkalstreptococcen eine quantitative Abtötung bei höheren TR-Konzentrationen trotz sehr hoher Temperaturen schwieriger.

#### 5.4 Gesamt-Verfahren

Das im Demonstrationsmaßstab realisierte Verfahren ist zur Nährstoffabtrennung aus Gülle, zur Entseuchung und zur Desodorierung geeignet. Die Phosphatabtrennung und dessen Konzentrierung in den Feststoffen ist mit einem Wirkungsgrad von mehr als 80 % als technisch ausgereift anzusehen. Die abgetrennten Feststoffe sind ohne Zusatz von Strukturmitteln kompostierbar und lagerfähig. Hinsichtlich der Belüftung zeigen die Ergebnisse, dass zum weitgehenden Geruchstoff- und Kohlenstoffabbau Belüftungsraten von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) bei Verweilzeiten von 2 – 3 d im Regelfall ausreichend wären. Unter diesen Bedingungen ist jedoch keine ausreichende Ammoniakstrippung zu erreichen. Die N-Elimination erfordert möglichst hohe Temperaturen und hohe Belüftungsraten. Angesichts eines NH<sub>4</sub>N/N<sub>ges</sub>-Verhältnisses von etwa 0,8 und einer Stickstoffassimilation in einer Größenordnung von 15 – 20 % des Ammoniumumsatzes bei der Belüftung können maximal 60 – 65 % des Gesamtstickstoffs aus Schweinegülle eliminiert werden. Hierfür sind bei Belüftungsraten von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) und Belüftungszeiten von mindestens 80 – 100 h erforderlich, selbst bei Maximaltemperaturen von bis zu 73 °C. Geringere Belüftungsraten oder niedrigere Temperaturen führen zu einer rapiden Verschlechterung der Ammoniakstrippung. Die Effektivität der N-Elimination ist damit in starkem Maße von der bei der Belüftung erreichbaren Temperatur und damit letztendlich von der BSB<sub>5</sub>-Konzentration in der Gülle abhängig. Die Entseuchung der Gülle ist nach den vorliegenden Ergebnissen praktisch kein Problem, so lange bei der Belüftung –zumindest über einige Stunden – Temperaturen von mehr als 50 °C erreicht werden. Der Energieverbrauch des Gesamtverfahrens wird im wesentlichen durch die Belüftung und die Entschäumung verursacht. Je nach Belüftungsrate und hydraulischer Verweilzeit beträgt der spezifische Energiebedarf 23,4 – 57,4 kWh/m<sup>3</sup> Rohgülle.

Angesichts der Ergebnisse, dass bei dem aerob-thermophilen Güllebehandlungsverfahren mit integrierter Ammoniakrückgewinnung die Ammoniakstrippung aus der Gülle die prozess-

limitierende Größe darstellt, können folgende Maßnahmen zur Verbesserung der Strippung getroffen und in Hinblick auf ihre Effektivität geprüft werden:

#### 1. Bioreaktor im reinen batch-Betrieb betreiben

Bei der quasikontinuierlichen Betriebsweise werden hohe Gülletemperaturen nur über wenige Stunden aufrechterhalten. Dies ist auf den Betriebszyklus zurückzuführen, bei dem täglich nach Abzug einer bestimmten Güllemenge aus dem Bioreaktor eine Wiederauffüllung mit kalter Frischgülle erfolgt (Kap. 4.2.1). Im reinen batch-Betrieb können hohe Temperaturen über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten werden und so zu einer Verbesserung der Strippung führen.

#### 2. Frischgülle vorwärmen

Mit der sich auf einem hohen Temperaturniveau befindlichen, belüfteten Gülle könnte die Frischgülle vorgewärmt werden. Hierfür wären jedoch Wärmetauscher erforderlich, die die Verfahrenskosten erhöhen würden. Allerdings sollte nur die Tagesmenge - zur Vermeidung stark temperaturabhängiger Methanisierungsvorgänge - vorgewärmt werden.

#### 3. Trennung von Belüftungs- und Stripp-Stufe

Belüftungsraten von  $5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$  sind für den Kohlenstoffabbau und damit zur Erzielung hoher Temperaturen völlig ausreichend (Kap. 4.1.3). Durch die geringeren Belüftungsraten werden höhere Temperaturen und längere Temperaturhaltezeiten auf hohem Niveau erreicht und damit wird das  $\text{NH}_3/\text{NH}_4$ -Dissoziationsgleichgewicht zugunsten des Ammoniaks verschoben bzw. auf hohem Niveau gehalten. In einer der Belüftung nachgeschalteten Stripp-Stufe könnte dann gezielt und effektiv Ammoniak entfernt werden. Die Stripp-Luft könnte dann zur Vermeidung von Wärmeverlusten in einem geschlossenen Kreislauf mit integrierter Ammoniakabsorption geführt werden. Die Verfahrenstechnik wäre in diesem Fall zwar aufwendiger als bei der simultanen Strippung im Rahmen der Güllebelüftung, aber der Verbrauch an elektrischer Energie, der im wesentlichen durch die Belüftung und die Entschäumung verursacht wird (Kap. 4.4.6, Tab. 4.104), könnte deutlich gesenkt werden.

## 6. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden die stofflichen Umsetzungen bei der aerob-thermophilen Belüftung von Schweinegülle bei unterschiedlichen Belüftungsraten (5, 10 und 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h)) untersucht. Die Ergebnisse der im halbertechnischen Maßstab durchgeführten Versuche bildeten die Grundlage für die Umsetzung in eine Demonstrationsanlage zur Güllebehandlung mit einer Jahreskapazität von 10.000 t.

Ziel der Arbeit waren Untersuchungen zum Kohlenstoffumsatz und die gezielte Nutzung der Selbsterhitzung zur Ammoniakstrippung aus Gülle und zur Inaktivierung pathogener Mikroorganismen.

Die Untersuchungen des Kohlenstoffumsatzes umfassten die Parameter Trockenrückstand (TR), Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB), Biochemischer Sauerstoffbedarf (BSB<sub>5</sub>) sowie flüchtige organische Säuren. Stickstoffumsetzungen wurden anhand der Parameter Ammonium und Gesamtstickstoff untersucht. Die mikrobiellen Untersuchungen erstreckten sich auf Gesamtzellzahl, Enterobakterien, Escherichia coli, Salmonellen und Fäkalstreptococci.

Die Geschwindigkeit des Kohlenstoffabbaus war im wesentlichen von der Belüftungsrate und der Gülletemperatur abhängig, der erzielte Abbaugrad von der Belüftungszeit. Schweinegülle ist mit einem BSB<sub>5</sub>/CSB-Verhältnis von durchschnittlich 0,35 nur eingeschränkt abbaubar. Der maximale Abbaugrad nach 100 h Belüftungszeit betrug bei den höchsten Belüftungsraten 27,8 % (TR), 42 % (CSB) bzw. 90 % (BSB<sub>5</sub>). Kürzere Belüftungszeiten oder geringere Belüftungsraten führten zu geringeren Abbaugraden. Bei den flüchtigen und geruchsintensiven Fettsäuren wurde ein 90 %-iger Abbau mit einer Belüftungsrate von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) nach spätestens 60 h erzielt. Bei steigenden Konzentrationen an Feststoffen in der Gülle trat jedoch eine zunehmende Versäuerung auf, so dass die Belüftungszeit zur Erreichung eines 90 % igen Abbaugrades zunahm.

Die bei der Belüftung erzielte Maximaltemperatur sowie die für eine Entseuchung relevante Temperatur-Haltezeit über 50 °C war von der BSB<sub>5</sub>-Konzentration und der Belüftungsrate abhängig. Mit steigender BSB<sub>5</sub>-Konzentration stieg die erzielte Maximaltemperatur auf Werte über 70 °C, während die Erhöhung der Belüftungsrate von 5 über 10 auf 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) zu einer Verkürzung der Temperatur-Haltezeit führte.

Die Elimination von Ammoniak war im wesentlichen von der Belüftungsrate, der Temperatur, der Belüftungszeit und dem pH-Wert abhängig. Die Entwicklung des pH-Wertes war von der Kohlendioxid-Strippung und dem Abbau flüchtiger organischer Säuren abhängig. Belüftungsraten von 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) ergaben bei Maximaltemperaturen von über 70 °C innerhalb von 100 h Belüftungszeit NH<sub>4</sub>N-Eliminationsgrade von etwa 55 %. Die Ammoniakstrippung setzte bei Temperaturen über 40 °C ein. Die Verdopplung der Belüftungsrate auf 10 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) führte zu einer deutlichen Steigerung der Ammonium-Elimination. Bei Maximaltemperaturen von über 70 °C wurde unter diesen Bedingungen innerhalb von 100 h Belüftungszeit 82 % des Ammoniaks eliminiert. Eine Ammoniakstrippung trat ab Temperaturen von 22 °C auf. Belüftungsraten von 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·h) ergaben unter diesen Bedingungen Eliminationsgrade von

86 %, wobei die Strippung bereits ab Temperaturen von 7 °C einsetzte. Geringere Maximaltemperaturen oder kürzere Belüftungszeiten ergaben bei allen getesteten Belüftungsraten geringere Eliminationsgrade.

Bedingt durch das mikrobielle Wachstum wird ein Teil des Ammoniums assimilatorisch in Biomasse eingebaut. Der Umfang dieser N-Assimilation war bei sehr kurzen Belüftungszeiten (20 h) mit etwa 35 % des Ammoniumumsatzes relativ hoch und fiel mit zunehmender Belüftungszeit (100 h) auf 18 % ab.

Angesichts eines  $\text{NH}_4\text{N}/\text{Nges}$ -Verhältnisses von durchschnittlich 0,8 in separierter Schweinegülle sowie der N-Assimilation bei der Belüftung in einer Größenordnung von etwa 20 % des Ammoniumumsatzes beträgt die maximale Nges-Elimination, die mit der aerob-thermophilen Belüftung erreicht werden kann, ca. 60 %.

Die Entseuchung von separierter Schweinegülle ist bei durchschnittlichen  $\text{BSB}_5$ -Konzentrationen, die eine Selbsterhitzung bis in den thermophilen Bereich erlauben, kein Problem. Enterobakterien, E. coli und Salmonellen werden bereits bei Temperaturen deutlich unterhalb von 50 °C innerhalb von 24 h inaktiviert. Für die Abtötung von Fäkalstreptococcen sind entweder höhere Temperaturen, längere Einwirkzeiten oder höhere Ammoniakkonzentrationen erforderlich.

Quasikontinuierliche Versuche bei hydraulischen Verweilzeiten von 1 – 5 d im halbtechnischem Maßstab haben gezeigt, dass der Kohlenstoffabbau bei Belüftungsraten von 10 und 20  $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  in linearer Form vom zugeführten Massenstrom abhängig ist. Die erzielten Abbaugrade bewegten sich häufig zwischen 25 und 35 % (CSB), 70 – 85 % ( $\text{BSB}_5$ ), 88 – 100 % (Essigsäure) und 93 – 100 % (Propionsäure).

Demgegenüber zeigte die N-Elimination aus Schweinegülle eher einen logarithmischen Zusammenhang mit dem N-Massenstrom im Zutrag. Die erzielten Wirkungsgrade bei Belüftungsraten von 20  $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  lagen bei Verweilzeiten von 2 – 4 d bei 44 – 68 % ( $\text{NH}_4\text{N}$ ) bzw. 32 – 49 % (Nges). Belüftungsraten von 10  $\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$  ergaben unter ansonsten vergleichbaren Bedingungen Eliminationsgrade von 18 – 42 % ( $\text{NH}_4\text{N}$ ) bzw. 12 – 33 % (Nges).

In Kombination mit mechanischen Trenneinrichtungen wurden in einer Demonstrationsanlage aus Schweinegülle etwa 25 % der Masse, 69 % der Feststoffe, 64 % des Gesamtstickstoffs und 84 % des Phosphates abgetrennt. Die mit den mechanischen Trenneinrichtungen erzielbaren Abscheidegrade für Feststoffe, Stickstoff und Phosphor konnten mit einfachen funktionalen Zusammenhängen berechnet werden. Der Energiebedarf, der im wesentlichen durch die Belüftung und die Entschäumung der Gülle verursacht wird, ist erheblich. Je nach Belüftungsrate und hydraulischer Verweilzeit beträgt der spezifische Energieverbrauch des Gesamtverfahrens 23,4 bis 57,4  $\text{kWh}/\text{m}^3$  Rohgülle.

## 7. Literatur

- [ 1] Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.): Agrarbericht der Bundesregierung, Bonn (1999).
- [ 2] Probst, F.-W.: Vorausschau auf den Schweinemarkt. Agrarwirtschaft 47: 259 – 264 (1998)
- [ 3] Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.): Tierproduktion in Niedersachsen, Hannover (1997).
- [ 4] N. N.: Verordnung über die Grundsätze der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung). BGBl (1996) Teil 1, Nr. 6, S. 118 – 121 vom 26.1.1996.
- [ 5] von Hammel, M.- L.: Mengen- und Nährstoffbilanz organischer Rest- und Abfallstoffe für die Landkreise Cloppenburg und Vechta und das Oldenburger Münsterland. Vechtaer Druck und Verlag, Vechta (1994).
- [ 6] Länderausschuss für Immissionsschutz (Hrsg.): Bewertung von Ammoniak- und Ammonium-Immissionen. LAI-Schriftenreihe Band 11, Erich Schmidt Verlag, Berlin (1996).
- [ 7] Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.): Bericht über den Zustand des Waldes 1998, Bonn (1998).
- [ 8] Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.): Bericht über den Zustand des Waldes 1999, Bonn (1999).
- [ 9] Umweltbundesamt (Hrsg.): Stoffliche Belastung der Gewässer durch die Landwirtschaft und Maßnahmen zu ihrer Verringerung. Erich Schmidt Verlag, Berlin (1994).
- [10] Umweltbundesamt (Hrsg.): Umweltdaten Deutschland 1998, Berlin (1998).
- [11] O'Neill, D. H., Phillips, V. R.: A review of the control of odour nuisance from livestock buildings: Part 3, properties of the odourous substances which have been identified in livestock wastes or in the air around them. J. agric. Res. 53: 23 – 50 (1992).
- [12] Guingand, N. et al.: Characterization of air extracted from pig housing: effects of the presence of slurry and the ventilation rate. Proceedings of the international symposium "Ammonia and odour control from animal production facilities: 49 –55, Vinkeloord, The Netherlands (1997).
- [13] Verdoes, N. et al. : Odour emissions from pig houses with low ammonia emission. Proceedings of the international symposium "Ammonia and odour control from animal production facilities: 317 – 325. Vinkeloord, The Netherlands (1997).
- [14] Jacobson, L. D. et al.: Comparison of hydrogen sulfide and odour emissions from animal manure storages. Proceedings of the international symposium "Ammonia and odour control from animal production facilities: 405 – 412. Vinkeloord, The Netherlands (1997).
- [15] Frechen, F. B.: Gerüche/Einzelstoffe. In: ATV-Dokumentation und Schriftenreihe aus Wissenschaft und Praxis 33: 29 – 40 (1994).
- [16] Maurer, P. G.: Systemstudie zur Erfassung und Verminderung von belästigenden Geruchsemissionen. In: BMFT (Hrsg.) Forschungsbericht T 79-114: 353 - 385, Bonn (1979).
- [17] Eich, K.-O.: Handbuch Schweinekrankheiten. Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup, 3. Auflage: 238 – 239, Münster-Hiltrup (1991).
- [18] Strauch, D.: Teilergebnisse der hygienisch-bakteriologischen Prüfung des Systems der Umwälzbelüftung. Landtechnische Forschung 18: 147 – 150 (1970).
- [19] Forstner, M. J.: Untersuchung über Grenztemperaturen zur Abtötung parasitärer Entwicklungsstadien. Wasser- und Abwasserforschung 7: 176 – 179 (1974).

- [20] Enigk, K. et al.: Die Lebensfähigkeit parasitärer Dauerformen bei der Fermentation von Rinderflüssigmist unter erhöhten Temperaturen. Zbl. Vet. Med. 22: 687 – 702 (1975).
- [21] Wassen, H., Strauch, D.: Das Umwälzbelüftungsverfahren (System Fuchs) zur Behandlung von flüssigen tierischen und kommunalen Abfällen. 2. Mitteilung: Hygienische Untersuchung bei der Umwälzbelüftung von Schweineflüssigmist. Berl. Münch. Tierärztl. Wschr. 88: 456 – 460 (1975).
- [22] Schaffert, R., Strauch, D.: Das Umwälzbelüftungsverfahren (System Fuchs) zur Behandlung von flüssigen tierischen und kommunalen Abfällen. 5. Mitteilung: Untersuchungen über die Abtötung von Spulwurmeiern in Schweinegülle und Klärschlamm. Berl. Münch. Tierärztl. Wschr. 89: 399 – 402 (1976).
- [23] Wassen, H., Strauch, D., Schwab, H.: Hygienische Untersuchungen bei der Umwälzbelüftung von Rinderflüssigmist. Berl. Münch. Tierärztl. Wschr. 89: 200 – 203 (1976).
- [24] Nagel, R., Straub, O. C., Strauch, D.: Das Umwälzbelüftungsverfahren (System Fuchs) zur Behandlung von flüssigen tierischen und kommunalen Abfällen. 6. Mitteilung: Vorläufige Untersuchungen über die Wirkung der Umwälzbelüftung auf ein vom Rind stammendes Picornavirus. Berl. Münch. Tierärztl. Wschr. 89: 443 – 445 (1976).
- [25] Strauch, D., Fleischle, W.: Preliminary investigations on pathogen survival in oxidation ditches under slatted floors in pig fattening units. Agr. Wastes 1: 39 – 44 (1979).
- [26] Böhm, H. O., Sieber, C., Strauch, D.: Das Umwälzbelüftungsverfahren (System Fuchs) zur Behandlung von flüssigen tierischen und kommunalen Abfällen. 8. Mitteilung: Die Wirkung der Umwälzbelüftung auf das Virus der Maul- und Klauenseuche. Berl. Münch. Tierärztl. Wschr. 93: 48 – 50 (1980).
- [27] Böhm, H. O., Sieber, C., Strauch, D.: Das Umwälzbelüftungsverfahren (System Fuchs) zur Behandlung von flüssigen tierischen und kommunalen Abfällen. 9. Mitteilung: Die Wirkung der Umwälzbelüftung auf das Virus der Aujeszky'schen Krankheit. Berl. Münch. Tierärztl. Wschr. 93: 112 – 114 (1980).
- [28] Kienlein, M.: Hygienische Untersuchungen am automatischen Stau-Umspül-Entmistungssystem eines Mastschweinestalles. Agrawiss. Diss. Univ. Hohenheim (1980).
- [29] Albrecht, H., Strauch, D.: Das Umwälzbelüftungsverfahren (System Fuchs) zur Behandlung von flüssigen tierischen und kommunalen Abfällen. 10. Mitteilung: Die Wirkung der Umwälzbelüftung auf Viren der Picorna-, Reo- und Adenogruppe. Berl. Münch. Tierärztl. Wschr. 93: 86 – 93 (1980).
- [30] Munch, B., Errebo Larsen, H., Aalbaek, B.: Experimental studies on the survival of pathogenic and indicator bacteria in aerated and non-aerated cattle and pig slurry. Biol. Wastes 22: 49 – 65 (1987).
- [31] Oechsner, H.: Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Entseuchung von Flüssigmist durch aerob-thermophile Stabilisierung. Agrawiss. Diss. Univ. Hohenheim (1991).
- [32] Rückert, V.: Mikrobiologische Untersuchungen zur aeroben und anaeroben Flüssigmiststabilisierung. Agrawiss. Diss. Univ. Hohenheim (1991).
- [33] Read, I. A., Svoboda, I. F.: Protozoan, bacterial and viral pathogens, farm wastes and water quality protection. Final report MAFF Open Contract CSA 2064, Scotland (1995).
- [34] Doll, L.: Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Entseuchung von Flüssigmist mittels thermophiler Faulung und aerob-thermophiler Stabilisierung. Agrawiss. Diss. Univ. Hohenheim (1999).



- [35] Schlegel, H. G.: Allgemeine Mikrobiologie. Georg Thieme Verlag 7. Auflage, Stuttgart (1992).
- [36] Rüprich, W.: Einsatz des Umwälzbelüfters für die Flüssigmistaufbereitung. Landtechnische Forschung 18: 142 – 147 (1970).
- [37] Thaer, R., Ahlers, R., Grabbe, K.: Behandlung von Rinderflüssigmit. Sdrh. Ber. Ldw. 192: 836 – 881 (1975).
- [38] Ginnivan, M. J.: The effect of aeration rates on odour and solids of pig slurry. Agricultural Wastes 7: 197 – 207 (1983).
- [39] Williams, A. G.: Indicators of piggery slurry odour offensiveness. Agricultural Wastes 10: 15 – 36 (1984).
- [40] Evans, M. R. et al.: Aeration and control of slurry odours by heterotrophs. Agricultural Wastes 15: 187 – 204 (1986).
- [41] Sneath, R. W., Burton, C. H., Williams, A. G.: Continuous aerobic treatment of piggery slurry for odour control scaled up to a farm size unit. J. agric. Engng. Res. 53: 81 – 92 (1992).
- [42] Burton, C. H.: A review on the strategies in the aerobic treatment of pig slurry: purpose, theory and method. J. agric. Engng. Res. 53: 249 – 272 (1992).
- [43] Owens, J. D. et al.: Aerobic treatment of piggery waste. Water Research Pergamon Press 7: 1745 – 1766 (1973).
- [44] Loll, U.: Einfluss der Behandlungstemperatur und Sauerstoffzufuhr, Abbau und Stabilisierung bei der Flüssigmistfermentation. Grundl. Landtechnik 28: 60 – 64 (1978).
- [45] Evans, M. R. et al. : Effect of microorganism residence time on aerobic treatment of piggery waste. Agricultural Wastes 1: 67 – 87 (1979).
- [46] Evans, M. R. et al.: Aerobic treatment of beef cattle and poultry waste compared with the treatment of piggery waste. Agricultural Wastes 2: 93 – 101 (1980).
- [47] Ginnivan, M. J. et al. : Thermophilic aerobic treatment of pig slurry. J. agric. Engng. Res. 26: 455 – 466 (1981).
- [48] Smith, M. P. W., Evans, M. R.: The effects of low dissolved oxygen tension during the aerobic treatment of piggery slurry in completely mixed reactors. Journal of Applied Bacteriology 53: 117 – 126 (1982).
- [49] Hissett, R. et al.: Oxygen consumption during batch aeration of piggery slurry at temperatures between 5 and 50 °C. Agricultural Wastes 4: 477 – 487 (1982).
- [50] Evans, M. R. et al.: The effect of temperature and residence time on aerobic treatment of piggery slurry - degradation of carbonaceous compounds. Agricultural Wastes 5: 25 – 36 (1983).
- [51] Blouin, M. et al.: Aerobic biodegradation of organic matter of swine Waste. Biological Wastes 25: 127 – 139 (1988).
- [52] Traulsen, H.: Vergleichende Betrachtung von Verfahren zur Beseitigung tierischer Exkrememente. Agrarwiss. Diss. Kiel (1971).
- [53] Jensen, F.- H.: Die Wirkung aerober Schweineflüssigdüngungsbehandlung auf die Geruchsminderung. Agrarwiss. Diss. Kiel (1974).
- [54] Grabbe, K.: Untersuchungen zum Stoffumsatz hochmolekularer Fraktionen im Flüssigmist. Grundl. Landtechnik 28: 64 – 68 (1978).
- [55] Ghaly, A. E., Kok, R.: Nitrogen transformation in swine manure in an oxidation ditch under aerobic conditions. ASAE 29: 799 – 806 (1986).
- [56] Wedekind, P., Reimann, W., Linke, B. : Verfahren zur umweltgerechten Aufbereitung von Gülle aus Schweinezuchtanlagen. Z. ges. Hyg. 30: 161 – 164 (1984).

- [57] Evans, M. R. et al. : Nitrogen and aerobic treatment of slurry. *Agricultural Wastes* 15: 205 – 213 (1986).
- [58] Oechsner, H., Rüprich, R.: Aerob-thermophile Behandlung von Flüssigmist. *Landtechnik* 44: 328 – 330 (1989).
- [59] Bock, E.: Nitrifikation – die bakterielle Oxidation von Ammoniak zu Nitrat. *Forum Mikrobiologie* 1: 24 – 32 (1980).
- [60] Nyhuis, G.: Beitrag zu den Möglichkeiten der Abwasserbehandlung bei Abwässern mit erhöhten Stickstoffkonzentrationen. Diss. Univ. Hannover (1985).
- [61] Anthonisen, A. C. et al.: Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid. *Journal WPCF* 48: 835 – 850 (1976).
- [62] Neufeld, R. D. et al.: Phenol and free ammonia inhibition to *Nitrosomonas* activity. *Water Research* 14: 1695 – 1703 (1980).
- [63] Turk, O., Marvinic, D. S.: Stability of nitrite build up in an activated sludge system. *Journal WPCF* 61: 1440 – 1448 (1989).
- [64] Fink, A.: Persönliche Mitteilung, (1993).
- [65] Winter, D. Persönliche Mitteilung, (1994).
- [66] N.N.: *Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau*. Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup, 12. Auflage, Münster-Hiltrup (1993).
- [67] Oechsner, H. et al.: Feststoffabtrennung aus Flüssigmist mit Pressschnecken-separatoren. *Agrartechnische Berichte des Institutes für Agrartechnik und der Landesanstalt für landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen der Universität Hohenheim* (1995).
- [68] Hügler, T.: Die Teilreinigung von Flüssigmist mittels Flockungsmitteln. In: KTBL (Hrsg.): *Umweltverträgliche Gülleaufbereitung*. 1. BMFT-Statusseminar zum Förderschwerpunkt „Umweltverträgliche Gülleaufbereitung und –verwertung, Surwold-Börgermoor (1993).
- [69] Bayley, R. W.: Desorption of waste water gases in air. *Effluent and Water Treatment Journal* 2: 78 – 83 (1967).
- [70] Slechta, A. F.; Culp, G. L.: Water reclamation studies at the South Tahoe Public Utility District. *Journal WPCF* 39: 787 – 814 (1967).
- [71] Benneworth, N. E.; Morris, N. G.: Removal of ammonia by air stripping. *Water Pollution Control*: 485 – 492 (1972).
- [72] Loehr, R. C. et al.: Development and demonstration of nutrient removal from animal wastes. EPA report No. R2-73-095, Washington (1973)
- [73] O'Farrell, T. P. et al.: Nitrogen removal by ammonia stripping. *Journal WPCF* 44: 1527 – 1535 (1972).
- [74] Gonzales, J. G.; Culp, R. L.: New developments in ammonia stripping. *Public Works* 5: 78 – 84 (1973).
- [75] Srinath, E. G.; Loehr, R. C.: Ammonia desorption by diffused aeration. *Journal WPCF* 39: 1939 – 1957 (1974).
- [76] Huber, L.: Stand der Entwicklung von Verfahren zur Stickstoffentfernung. *Münchener Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Fischbiologie* 29: 203 – 216 (1978).
- [77] Damieki, R.; Kühn, W.: Ammoniak-Recycling in der Abwassertechnik. *Forschungsbericht der Oswald-Schulze-Stiftung* (1982).
- [78] Idelovitch, E.; Michail, M.: Nitrogen removal by free ammonia stripping from high pH ponds. *Journal WPCF* 53: 1391 – 1401 (1981).
- [79] O'Brien, D. J. et al.: Ammonia removal from deliming effluent by stripping reabsorption. *Journal American Leather Chemists Association* 81: 125 – 136 (1986).

- [80] Sautelli, J.: Elimination von Ammoniak mittels Strippung aus den Rückläufen bei der Behandlung von Klärschlamm. Verband Schweizerischer Abwasserfachleute. Verbandsbericht 414, (1989).
- [81] Khabiri, S. et al.: Ammonia removal from waste water by steam stripping. A process evaluation. 43 th Purdue Industrial Waste Conference Proceedings, Chelsea (1989).
- [82] Beg, S. A. et al.: Studies on ammonia stripping in a cocurrent orifice plate scrubber. Chem.-Ing.-Tech. 61: 338 – 339 (1989).
- [83] Kühn, W.: Untersuchungen zur Stickstoffrückgewinnung und Phosphorelimination aus Abwässern durch Kombination von Fällung und Desorption. Gewässerschutz-Wasser-Abwasser 110 (1989).
- [84] Kotter, M. et al.: Entfernung von Ammoniak aus Abwässern durch Strippung und Sorption an Zeolithen. Chem.-Ing.-Tech. 61: 74 – 75 (1989).
- [85] Kettern, J.: Untersuchungen zur biologisch-chemisch-physikalischen Behandlung von Deponiesickerwässern. Gewässerschutz Wasser Abwasser 113 (1990).
- [86] Marr, R.; Koncar, M.: Rückgewinnung von Ammoniak aus Industrieabwasser. Chem.-Ing.-Tech. 62: 175 – 182 (1990).
- [87] Wetter, C.; Pöppinghaus, K.: Physikalisch-chemische Ammoniumelimination aus Zentratwasser. Korrespondenz Abwasser 39: 205 – 210 (1992).
- [88] Gajewski, W. et al.: Physikalisch-chemische Ammoniumeliminierung aus dem Abwasser einer Tierkörperbeseitigungsanlage. Korrespondenz Abwasser 40: 526 – 534 (1993).
- [89] Rautenbach, R.; Machhammer, O.: Aufarbeitung Ammoniak enthaltener Abwässer-Verfahrens- und Kostenvergleich. Chem.-Ing.-Tech. 60: 23 – 31 (1988).
- [90] Chafik, E.: Desorption von Ammoniak aus REA-Abwasser. Chemie-Technik 20: 130 – 136 (1991).
- [91] Scheffer, B.: Zum Einsatz von Rotschlamm und Grünsalz auf als Grünland genutzten sauren Hochmoorböden. KA-Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 47: 872 – 875 (2000).
- [92] Iske, U., Brodalla, D.: Erfahrungen mit dem Einsatz einer Aluminiumhydroxidsuspension aus der Aluminiumoberflächenbehandlung zur Phosphorelimination auf kommunalen Kläranlagen. KA-Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 48: 365 – 372 (2001).
- [93] N. N.: Klärschlammverordnung (AbfKlärV). BGBl I, S. 912 vom 15.4.1992
- [94] ATV/BDE/VKS-Fachausschuss 3.2 (Hrsg.): Auswahl und Einsatz von organischen Flockungshilfsmitteln – Polyelektrolyten – bei der Klärschlammmentwässerung. Korrespondenz Abwasser 39: 569 – 580 (1992).
- [95] ATV/BDE/VKS-Fachausschuss 3.2 (Hrsg.): Einstufung von organischen Flockungshilfsmitteln – Polyelektrolyten – in Wassergefährdungsklassen. Korrespondenz Abwasser 46: 267 – 268 (1999).
- [96] Barion, D., Scheffer, B.: Beeinflussung der Grundwasserqualität durch Wirtschaftsdünger und Sekundärrohstoffe unter besonderer Berücksichtigung problematischer Stoffgruppen. KA-Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 47: 1667 – 1670 (2000).

## 8. Anhang

### 8.1 Verzeichnis der Abkürzungen

A	Stromstärke [Ampere]
A <sub>24</sub>	Gülleaustrag nach 24 h
a	Jahr
AFS	Abfiltrierbare Stoffe
AG	Abscheidegrad
AKV	Aujeszký-Virus
Amp	Ampulle
BLR	Belüftungsrate
BPLA-Agar	Brilliantgrün-Phenolrot-Laktose-Saccharose-Agar
BSB <sub>5</sub>	Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen
BSB <sub>5,o</sub>	Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen bei Versuchsbeginn
BSB <sub>5s</sub>	Gelöster biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen
BSB <sub>5tot</sub>	Gesamter biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen
BSB <sub>5Überstand</sub>	BSB <sub>5</sub> -Konzentration nach Zentrifugation
c	Konzentration
C2	Essigsäure
C3	Propionsäure
C4	Buttersäure
C5	Valeriansäure
cm	Zentimeter
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
CSB <sub>0</sub>	Chemischer Sauerstoffbedarf der Probe zu Versuchsbeginn
CSB <sub>tot</sub>	Gesamter chemischer Sauerstoffbedarf
CSB <sub>s</sub>	Gelöster chemischer Sauerstoffbedarf
d	Tag
d	delta
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
E <sup>+</sup>	Elektrische Schaltung mit oberem Grenzwert
EBA	Enterobakterien
ECBO-Virus	Rinderenterovirus
E. coli	Escherichia coli
EL	Elimination
EN	Europäische Norm
exp	Exponent
F	Verhältnis N-Strippung/N-Assimilation
Fa.	Firma
FI	Durchflussanzeige
FKS	Fäkalstreptococcen
FOS	Flüchtige organische Säuren
g	Gramm
GKZ	Gesamtkeimzahl

H	Handeingriff
h	Stunde
ha	Hektar (10.000 m <sup>2</sup> )
HPLC	High pressure liquid chromatography
I	Stromstärke [A]
IC4	Iso-Buttersäure
IC5	Iso-Valeriansäure
Index A	Anfang
Index E	Ende
IR	Infrarot
k	Konstante
K	Kelvin
Kap	Kapitel
KBE	Koloniebildende Einheiten
KC1-4	Zeitmessung mit selbsttätiger Regelung und fortlaufender Steuerung
kg	Kilogramm
KID	Kulturinfektiöse Dosis
KT	Keimträger
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
LF	Elektrische Leitfähigkeit
LF <sub>0</sub>	Elektrische Leitfähigkeit der Probe vor Versuchsbeginn
LIS <sup>+</sup>	Füllstandsmessung, Anzeige und Schaltung mit oberen Grenzwert
Ln	natürlicher Logarithmus
LUFA	Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt
M	Motor
m	Masse, Meter
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
mg	Milligramm
min	Minute
Mio	Million
ml	Milliliter
mol	Einheit der Substanzmenge (Molmasse)
MPN	Most probable number
mS	Milli-Siemens
mV	Millivolt
MHV	Mittlere hydraulische Verweilzeit
N	Stickstoff
n	Anzahl
n. a.	nicht ausgewertet
n. b.	nicht bestimmt
n. e.	nicht erreicht
Nges	Gesamtstickstoff
Nges <sub>0</sub>	Nges-Konzentration der Probe zu Versuchsbeginn
NH <sub>3</sub> N	Ammoniak-Stickstoff
NH <sub>4</sub> N	Ammonium-Stickstoff

NH <sub>4</sub> N <sub>0</sub>	NH <sub>4</sub> N-Konzentration der Probe zu Versuchsbeginn
nm	Nanometer (10 <sup>-9</sup> m)
n. n.	nicht nachweisbar
NO <sub>2</sub> N	Nitrit-Stickstoff
NO <sub>3</sub> N	Nitrat-Stickstoff
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
Org.	Organisch
OTR	Organischer Trockenrückstand
P	Elektrische Leistung
p.A.	Reinheitsgrad „pro analysis“
P1-3	Pumpen
Pges	Gesamphosphat, gemessen nach Aufschluss als PO <sub>4</sub> -P
pH	pH-Wert
PI	Druckanzeige
PP	Polypropylen
QIR	Messwerterfassung, Anzeige und Registrierung
R	Verweilzeit
r <sup>2</sup>	Bestimmtheitsmaß
RT	Raumtemperatur
s	Sekunde
Sal	Salmonellen
t	Tonne, Zeit
T	Temperatur
T <sub>50</sub>	Temperaturhaltezeit bei 50 °C
TIR	Temperaturmessung, Anzeige und Registrierung
T <sub>max</sub>	Maximaltemperatur
TR	Trockenrückstand
TS	Trockensubstanz
U	Spannung [Volt]
V	Versuch
v	Reaktionsgeschwindigkeit
V-Nr	Versuchs-Nummer
Vol.	Volumen
VRBD-Agar	Violet Red Bile Dextrose Agar
WG	Wirkungsgrad
WIS	Massenerfassung, Anzeige und Schaltung
x	Belüftungszeit, Versuchszeit
X <sub>BSB5</sub>	BSB <sub>5</sub> – Abbaugrad
X <sub>CSB</sub>	CSB – Abbaugrad
X <sub>NH4N</sub>	NH <sub>4</sub> N – Eliminationsgrad
X <sub>Nges</sub>	Nges - Eliminationsgrad
XLD-Agar	Xylose Lysine Desoxycholate Agar
y <sub>C2</sub>	Konzentration an Essigsäure
y <sub>C3</sub>	Konzentration an Propionsäure
y <sub>IC4</sub>	Konzentration an Isobuttersäure
y <sub>C4</sub>	Konzentration an Buttersäure
y <sub>IC5</sub>	Konzentration an Isovaleriansäure

$y_{C5}$	Konzentration an Valeriansäure
$y_D$	Abscheidegrad des Dekanters
$y_{FOS}$	Konzentration an flüchtigen organischen Säuren
$y_M$	Massenabscheidegrad
$y_{Nges}$	Abscheidegrad für Nges
$y_{Pges}$	Abscheidegrad für Pges
$y_S$	Abscheidegrad des Separators
$y_{TR}$	Abscheidegrad für Feststoffe
$Z_{24}$	Güllezutrag nach 24 h

## 8.2 Analysenkurzbeschreibungen, Geräte und Chemikalien

### **Temperatur (DIN 38404-C4)**

**Prinzip:** Bei der Temperaturmessung mit Widerstandssensoren wird die temperaturabhängige Widerstandsänderung von Platin genutzt. Der Messwiderstand wird von einem konstanten Strom gespeist. Der Spannungsabfall, der sich mit dem Widerstandswert über die Temperatur ändert, wird gemessen.

**Geräte und Chemikalien:** Widerstandssensoren PT 100 und Messwertverstärker, Fa. Rössel, Messtechnik GmbH, Werne.

### **Elektrische Leitfähigkeit (EN 27888)**

**Prinzip:** Die elektrische Leitfähigkeit wird nach dem 2-Elektroden-Verfahren bestimmt, wobei der elektrolytische Widerstand der Probe zwischen den beiden Elektroden der Leitfähigkeitmesszelle gemessen wird. Die notwendige Temperaturkompensation erfolgt über ein PT 100.

**Geräte und Chemikalien:** Leitfähigkeitsmessgerät WTW LF 95, Leitfähigkeitselektrode Tetra Con 96, Fa. WTW, Weilheim in OB. Kaliumchlorid-Standardlösungen nach EN 27888.

### **pH-Wert (DIN 38404-C5)**

**Prinzip:** Die Bestimmung des negativen dekadischen Logarithmus des Zahlenwertes der in mol/l angegebenen Wasserstoffionenaktivität (pH-Wert) erfolgt mit Glaselektroden-Messketten. Diese Messketten bestehen aus einer Glaselektrode, welche ein dem pH-Wert proportionales elektrisches Potenzial liefert und einer Bezugslektrode, deren Potenzial unabhängig vom pH-Wert und den sonstigen Eigenschaften der Probe ist. Das gemessene Spannungspotential ist dem pH-Wert proportional. Es beträgt bei pH 7 0 mV und ist temperaturabhängig.

**Geräte und Chemikalien:** pH-Meter WTW 96, Fa. WTW, Weilheim in OB, pH-Elektrode E 50, Fa. Mettler-Toledo, Tänikon, Schweiz, technische Pufferlösungen pH 4,01 7,0 und 10,0 Fa. WTW, Weilheim in OB.

### **Redox-Spannung (DIN 38404-C6)**

**Prinzip:** Die Redox-Spannung wird durch in der Probe gelöste oxidierende und reduzierende Stoffe verursacht, sofern diese an der Elektrodenoberfläche wirksam werden. Sie wird angegeben als Spannung zwischen einem inerten Elektronenleiter und der Standardwasserstoffelektrode. Aus praktischen Gründen wird die Messung mit

Platinelektroden gegen eine Silber/Silberchlorid-Bezugselektrode durchgeführt und die gemessene Spannung auf die Standardwasserstoffelektrode umgerechnet.

**Geräte und Chemikalien:** Messgerät WTW 96, Platinelektrode PT 4805, Fa. WTW, Weilheim in OB. Prüflösung (Redox-Puffer) nach DIN 38404-C6.

### ***Gelöstsauerstoff (EN 25814)***

Die Messung des Gelöstsauerstoffs erfolgt nach dem polarometrischen Verfahren mit einer membranbedeckten Messzelle. Sie besteht aus einem Elektrolytraum mit Goldkathode, Silberanode und einem Kaliumchlorid/Kaliumhydroxid-Elektrolyten. Die Messzelle ist durch eine Kunststoffolie verschlossen. Der in der Probe gelöste Sauerstoff diffundiert durch die Kunststoffolie in den Elektrolyten und bewirkt an der Kathode einen Polarisationsstrom, der der Sauerstoffkonzentration proportional ist. Die Temperaturkompensation erfolgt über ein PT 100.

**Geräte und Chemikalien:** Messgerät WTW Oxi 521, Sauerstoffelektrode EO 166, Fa. WTW, Weilheim in OB.

### ***Luftsauerstoff***

**Prinzip:** Das Messverfahren beruht auf den paramagnetischen Eigenschaften von Sauerstoffmolekülen. Unter der Einwirkung eines inhomogenen Magnetfeldes ergibt sich eine Ausrichtung der Dipole und damit eine Polarisation, die der Sauerstoffkonzentration im Messgas proportional ist.

**Geräte und Chemikalien:** Gasanalysegerät Oxymat 2, Fa. Siemens, Karlsruhe.

### ***Kohlendioxid in der Gasphase***

**Prinzip:** Das Messverfahren zur Bestimmung des gasförmigen Kohlendioxids mit einem IR-Spektrometer beruht auf der Absorption von infrarotem Licht. Bei der Infrarot-Spektroskopie werden Moleküle durch eine Infrarotstrahlungsquelle angeregt, wodurch charakteristische Molekülschwingungen auftreten (Valenz- und Deformationsschwingungen). Die hierdurch bedingte Strahlungsabsorption in der Messküvette wird von einem Detektor erfasst und zur Konzentrationsbestimmung ausgewertet.

**Geräte und Chemikalien:** NDIR-Gasanalysator UNOR 6N, Fa. Maihak, Hamburg.

### ***Kjeldahl-Stickstoff (EN 25663)***

**Prinzip:** Organisch gebundener Stickstoff wird unter sauren Reaktionsbedingungen hydrolysiert, wobei Ammonium gebildet wird. Das vorhandene und aus dem organischen Stickstoff zusätzlich gebildete Ammonium wird durch Natronlauge zu Ammoniak umgesetzt und mittels Wasserdampfdestillation in eine Vorlage aus Borsäure überführt. Durch Rücktitration mit Schwefelsäure auf einen Farbumschlag (bei Einsatz von pH-Indikatoren) oder auf den Ausgangs-pH kann Ammonium quantitativ bestimmt werden.

Die eingewogene Probe (5 - 10 g) wird nach Zugabe von konzentrierter Schwefelsäure (10 – 20 ml), einem Kjeltab und Siedesteinen über ein Temperaturprogramm (maximal 410 °C) in 3,5 h vollständig hydrolysiert. Nach Abkühlung der Probe und Anschluss an die Destillationsapparatur erfolgt die Zugabe von demineralisiertem Wasser und Natronlauge zur Alkalisierung. Anschließend wird die Destillation gestartet (Dauer: 7 min, Dampfstärke: 9). Das Destillat wird in 50 ml einer 2 %igen Borsäurelösung aufgefangen, die mit 200 µl Mischindikator 5 versetzt wurde. Das aufgefangene Destillat wird mit 0,1 normaler Schwefelsäure bis zum Farbumschlag von grün auf schwach violett titriert.



**Geräte und Chemikalien:** Kjeldahltherm-Aufschlussgläser 250 ml, Fa. Gerhardt, Bonn, Erlenmeyerkolben 250 ml, Fa. Schmidt, Braunschweig, Kjeltabs S (5 g Kaliumsulfat und 0,005 g Selen), Fa. Gerhardt, Bonn, Schwefelsäure 95 – 97 % p. A., Fa. Merck, 100732, Darmstadt, Natronlauge 50 % p. A Merck 158793, Darmstadt, Borsäure, Fa. Merck 100765, Darmstadt, Mischindikator 5, Merck 106130, Darmstadt, Siedesteine Sorte B, Fa. Schmidt, Braunschweig, Turbosog, Fa. Gerhardt, Bonn, Kjeldahltherm-Aufschlussgerät KB 20 S, Fa. Gerhardt, Bonn, Variostat, Fa. Gerhardt, Bonn, Vapodest 12 und 20, Fa. Gerhardt, Bonn, Laborwaage 1574, Fa. Satorius, Göttingen.

### ***Ammonium-Stickstoff (in Anlehnung an DIN 38406-E5-2)***

**Prinzip:** Ammonium wird durch Natronlauge zu Ammoniak umgesetzt und mittels Wasserdampfdestillation in eine Vorlage aus Borsäure überführt. Durch Rücktitration mit Schwefelsäure auf einen Farbumschlag (bei Einsatz von pH-Indikatoren) oder auf den Ausgangs-pH kann Ammonium quantitativ bestimmt werden.

Die eingewogene Probe (5 - 10 g) wird nach Zugabe von demineralisiertem Wasser und Natronlauge destilliert (Dauer: 7min, Dampfstärke: 9). Das Destillat wird in 50 ml einer 2 %igen Borsäurelösung aufgefangen, die mit 200 µl Mischindikator 5 versetzt wurde. Anschließend wird das aufgefangene Destillat mit 0,1 normaler Schwefelsäure bis zum Farbumschlag von grün nach violett titriert.

**Geräte und Chemikalien:** Kjeldahltherm-Aufschlussgläser 250 ml, Fa. Gerhardt, Bonn, Dispenser Hirschmann-Laborgeräte, 10 – 60 ml, Fa. Schmidt, Braunschweig, Borsäure p.A., Merck 100765, Darmstadt, Mischindikator 5, Merck 106130, Darmstadt, Erlenmeyerkolben 250 ml, Fa. Schmidt, Braunschweig, Vapodest 12 und 20, Fa. Gerhardt, Bonn, Natronlauge 50 % p.A., Merck 158793, Darmstadt, Schwefelsäure 0,1 normaler Titrisol, Merck 109984, Darmstadt, Dosimat 725, Fa. Metrohm, Filderstadt, Laborwaage 1574, Fa. Satorius, Göttingen.

### ***Nitrit-Stickstoff (in Anlehnung an EN 26777)***

**Prinzip:** In saurer Lösung reagieren Nitrite mit primären aromatischen Aminen unter Bildung von Diazoniumsalzen. Diese bilden mit aromatischen Verbindungen, die eine Hydroxyl- oder Aminogruppe enthalten, intensiv gefärbte Azofarbstoffe, die bei einer Wellenlänge von 545 nm photometrisch bestimmt werden.

Nach einer Zentrifugation der Probe (20 min, 15.000 g), Abtrennung und einer Verdünnung des Überstandes (1:100) werden 50 ml des Überstandes mit 0,25 g Magnesiumoxid versetzt und 2 min geschüttelt. Nach erneuter Zentrifugation und Ansäuerung des gewonnenen Überstandes auf pH 5 (Schwefelsäure) erfolgt die Bestimmung über Küvettentest LCK 341, Fa. Dr. Lange.

**Geräte und Chemikalien:** Magnesiumoxid, p.A., Merck 105865, Darmstadt, Schwefelsäure 0,1 normaler Titrisol, Merck 109984, Darmstadt, Küvettentest LCK 341, Photometer LP2W, ISIS 9000, Fa. Dr. Lange, Düsseldorf, Varifuge 20 RS, Fa. Heraeus, Osterode.

### ***Nitrat-Stickstoff (in Anlehnung an DIN 38405-D9-2)***

**Prinzip:** In schwefel- und phosphorsaurer Lösung reagieren Nitrat-Ionen mit 2, 6-Dimethylphenol zu 4-Nitro-2, 6-dimethylphenol. Die photometrische Bestimmung erfolgt bei einer Wellenlänge von 360 nm.

Die Probenaufarbeitung erfolgt wie bei der Nitritbestimmung. Der auf pH= 5 eingestellte Überstand wird mit Amidoschwefelsäure versetzt und nach 2 min mit dem Küvettentest LCK 339, Fa. Dr. Lange bestimmt.

**Geräte und Chemikalien:** Küvettentest LCK 339, Dr. Lange, Düsseldorf, Photometer LP2W, ISIS 9000, Fa. Dr. Lange, Düsseldorf, Varifuge 20 RS, Fa. Heraeus, Osterode, Amidoschwefelsäure, p.A., Merck 100103.

### ***Flüchtige organische Säuren (FOS)***

**Prinzip:** In saurer Lösung können mittels Wasserdampfdestillation flüchtige organische Säuren destilliert und in einer wässrigen Vorlage aufgefangen werden. Aus dem gewonnenen Destillat kann die Konzentration der einzelnen Säuren über die Flüssigchromatographie bestimmt werden.

50 g Gülle werden in einen 500 ml Rundkolben eingewogen und mit 7,5 ml einer 85 %igen Phosphorsäure versetzt. Die so vorbereitete Probe wird über 40 min bei Dampfstärke 7 destilliert. Das Destillat wird in einem 1000 ml Rundkolben aufgefangen, in dem 100 ml demineralisiertes Wasser vorgelegt wurden. Das Destillat wurde unter Rückfluss 10 min gekocht und anschließend mit Schwefelsäure auf einen pH-Wert von 2 eingestellt. Nach Abfüllung in HPLC-Vials erfolgte die Bestimmung über die Flüssigchromatographie.

**Geräte und Chemikalien:** Kjeldahltherm-Aufschlussglas 500 ml, Fa. Gerhardt, Bonn, Phosphorsäure 85 % p.A., Merck 159382, Darmstadt, Vapodest 12 und 20, Fa. Gerhardt, Bonn, Rundkolben 1000 ml, Messzylinder 100 ml, Becherglas 100 ml, Vollpipette 10 ml, Fa. Schmidt, Braunschweig, Schwefelsäure 0,1 normaler Titrisol, Merck 109984, Darmstadt, HPLC-Fläschchen, Fa. Schmidt, Braunschweig, Laborwaage 1574, Fa. Satorius, Göttingen, HPLC-System: Flüssigchromatograph LC-10AD, Autosampler SIL-10A, IR-Detektor RID 6A, UV-VIS Detektor SPD-10AV, Fa. Shimadzu, Duisburg, Säule HPX87H, Fa. Bio-Rad, München, Laufmittel: 0,005 mol/l Schwefelsäure (Titrisol, verdünnt), Flußrate: 0,8 ml/min, Injektionsvolumen: 60 µl, Ofentemperatur: 60 °C, Analysenzeit: 80 min.

### ***Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen (BSB<sub>5</sub>) (EN 1899)***

**Prinzip:** In einem mit Sauerstoff angereicherten und unterschiedlich verdünnten Abwasser wird der Sauerstoffverbrauch von Mikroorganismen beim Abbau von Abwasserinhaltsstoffen gemessen. Der Sauerstoffverbrauch ergibt sich unter Berücksichtigung des Sauerstoffverbrauches des Verdünnungswassers aus Differenz der Sauerstoffkonzentration der frisch angesetzten Probe und der Sauerstoffkonzentration, die nach Ablauf von 5 Tagen bei 20 °C gemessen wird.

Nach Herstellen von geeigneten Probenverdünnungen (abzuschätzen über den CSB und dem Anteil abbaubaren Kohlenstoffs) und der Zugabe eines Nitrifikationshemmers (2 mg je Ansatz) wird der Sauerstoffgehalt in den Startproben bestimmt. Die anderen Proben werden über 5 Tage bei 20 °C im Dunkeln inkubiert. Abschließend erfolgt eine erneute Bestimmung der Sauerstoffkonzentration. Der Sauerstoffverbrauch ergibt sich aus der Differenz der Sauerstoffkonzentrationen zu Beginn und nach Ablauf von 5 Tagen unter Berücksichtigung der Probenverdünnung und der Sauerstoffzehrung der unbelasteten Probe.

**Geräte und Chemikalien:** Karlsruher Flaschen 250 ml, Fa. Schmidt, Braunschweig, Sauerstoffmessgerät Oxi 530, Sauerstoffelektrode TriOximatic EO 200, Fa. WTW, Weilheim in OB, BSB-Thermoschrank Typ 601/2, Fa. WTW, Weilheim in OB, N-Allylthioharnstoff zur Synthese, Merck 808158, Darmstadt.

### **Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) (in Anlehnung an DIN 38409-H41-1)**

**Prinzip:** In schwefelsaurer Kaliumdichromat-Lösung reagieren oxidierbare Stoffe mit Silbersulfat als Katalysator, wobei Chrom  $^{6+}$  zu Chrom  $^{3+}$  reduziert wird. Chlorid wird mit Quecksilbersulfat maskiert. Die photometrische Bestimmung des Chrom  $^{3+}$  erfolgt bei einer Wellenlänge von 610 nm.

Nach Herstellung geeigneter Verdünnungen und Küvettenfüllung erfolgt die Hydrolyse und Oxidation bei 148 °C über 2h. Nach Abkühlung der Küvetten werden die Proben photometrisch vermessen.

**Geräte und Chemikalien:** Aufschlussblock TCS Thermostat, Labor Technik Barkey, Bielefeld, Küvettentest LCK 114, Photometer LP2W, ISIS 9000, Fa. Dr. Lange, Düsseldorf.

### **Trockenrückstand, organischer Trockenrückstand (TR/OTR) (DIN 38414-S2 und S3)**

**Prinzip:** Die in einen konstant gewogenen Porzellan-Tiegel eingewogene Gülleprobe wird bei 105 °C über 48 h getrocknet. Nach Abkühlung des Tiegels im Exsikkator erfolgt die Auswiegung. Anschließend wird die Probe bei 550 °C über 6 h verascht und nach Abkühlung im Exsikkator erneut ausgewogen. Die Differenz aus Trockenmasse und Asche ergibt den organischen Trockenrückstand.

**Geräte und Chemikalien:** Porzellantiegel 50 ml, Exsikkator, Fa. Schmidt, Braunschweig, Trockenschrank UT 6420, Muffelofen MR 260 E, Fa. Heraeus, Osterode, Laborwaage 1574, Fa. Satorius, Göttingen.

### **Gesamt-Phosphat**

**Prinzip:** Phosphationen bilden mit Vanadat-Molybdat-Reagenz einen gelben Komplex, der photometrisch bei 405 nm gemessen wird.

Nach Probearbeit (5 - 10 g) und Zugabe von 10 ml Schwefelsäure, eines Kjeltabs und von Siedesteinen erfolgt der Probenaufschluss über 3,5 h mit einer Maximaltemperatur von 410 °C. Anschließend wird die Probe quantitativ in ein Becherglas überführt und mit Natronlauge auf einen pH-Wert von 3 – 4 eingestellt. Danach erfolgt über eine Filtration die Überführung in einen 250 ml-Kolben und eine entsprechende Verdünnung. Die photometrische Bestimmung mit Küvettentest LCK 049 erfolgt bei 405 nm.

**Geräte und Chemikalien:** Kjeldahltherm-Aufschlussglas 250 ml, Kjeltabs S (5 g Kaliumsulfat und 0,005 g Selen), Fa. Gerhardt, Bonn, Schwefelsäure 95 – 97 %, p.A., Merck 100732, Darmstadt, Siedesteine Sorte B, Fa. Schmidt, Braunschweig, Turbosog, Fa. Gerhardt, Bonn, Kjeldahltherm-Aufschlussgeräte KB 20 S mit Temperaturprogramm, Variostat, Fa. Gerhardt, Bonn, Becherglas, 250 ml, Fa. Schmidt, Braunschweig, Faltenfilter 595 ½, Scheicher und Schüll, Fa. Schmidt, Braunschweig, Natronlauge 50 % p.A., Merck 158793, Darmstadt, Messkolben 250 ml, Fa. Schmidt, Braunschweig, pH-Meter WTW 96, Elektrode E 50, Fa. WTW, Weilheim in OB, Magnetrührer Ikamag Reo, Ika, Staufen, Mangetkerne, Fa. Schmidt, Braunschweig, Küvettentest LCK 049, Dr. Lange, Düsseldorf, Laborwaage 1574, Fa. Satorius, Göttingen.

## **Danksagung**

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Abteilung Technologie, die über Jahre zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen haben, möchte ich herzlich danken.

Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. K.-D. Vorlop für die wissenschaftliche Betreuung und umfangreiche Unterstützung.

Herrn Privatdozent Dr. H.-J. Jördening möchte ich für die Übernahme des Koreferates und die kritische Durchsicht dieser Arbeit danken.

Herrn Dr. Schuchardt, Herrn Dr. Janssen und Herrn Sonnenberg verdanke ich vielfältige Anregungen aus der gemeinsamen Forschungsarbeit und den intensiven fachlichen Diskussionen.

Besonderer Dank gilt Herrn Klank für den Bau der Versuchsanlagen und die unerschöpfliche Bereitschaft, die Versuchsanlagen wieder und wieder zu verbessern.

Herrn Asendorf und Herrn Breford möchte ich für die Realisierung der Anlagensteuerung ebenso danken wie für die ständige Hilfsbereitschaft bei steuerungstechnischen Problemen.

Frau Engelke gebührt meine besondere Dankbarkeit für die Zuverlässigkeit und Ausdauer bei der Untersuchung unendlicher Gülleproben und ihrer nicht nachlassenden Kooperationsbereitschaft.

Herr Poppen hat den reibungslosen Betrieb aerob-thermophilen Güllebehandlungsanlage in Cloppenburg sichergestellt und zur damit wesentlich zum Erfolg des Verfahrens beigetragen. Ihm gebührt mein ausdrücklicher Dank für die geleistete Arbeit.